

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Roboty přímo spolupracující s člověkem
Direct cooperation of Robots with Humans

Disertační práce

Studijní program: P2346 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301V013 Robotika

Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Novák

Doktorand: Ing. Aleš Vysocký

Ostrava, 2019

Anotace disertační práce:

VYSOCKÝ, Aleš. *Roboty přímo spolupracující s člověkem*, Katedra robotiky, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 98 stran, 85 obrázků, 12 tabulek, 3 přílohy. Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Novák

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou spolupráce robotu s člověkem. Aktuální téma průmyslové robotizace otevírá možnosti vytváření pracovišť s roboty, které mohou přijít do přímého kontaktu s obsluhou pracoviště v průběhu pohybu zařízení. To přináší benefity robotizace na místech, kde byla využívána pouze manuální práce, a nové příležitosti a možnosti výroby. Přináší ale také rizika spojená s možností kolize s pohybujícím se strojem.

V úvodních kapitolách jsou analyzovány aktuální standardy definující základní pojmy a způsoby spolupráce robotu s člověkem. Dále je proveden průzkum již existujících řešení a jejich zhodnocení a posouzení výhod a nevýhod. Přehled dostupných technologií, zařízení pro zajištění bezpečnosti a způsobů detekce kolize, a také samotných robotů vykresluje aktuální možnosti pro vytváření bezpečných pracovišť.

Zadání práce vychází z potřeb firmy ŠKODA AUTO a.s. na zařazení této technologie do procesu výroby automobilů. Požadavkem nejen na teoretický průzkum možností, ale také na praktickou realizaci pracoviště vznikla příležitost navržené řešení důkladně vyprojektovat, ale i realizovat a ověřit a vyhodnotit dodržení standardů, a také přínosů této technologie. V práci je popsána předprojektová fáze volby vhodného pracoviště, stanovení požadavků a zadání nového systému. Následně popisuje jeho realizaci a ověření funkcí. Navržená metodika postupu návrhu kombinuje předpisy stanovené normami, ale také poznatky z realizace pilotního pracoviště, které je dle dostupných zdrojů unikátní v rozsahu spolupráce robotu s člověkem přímo v provozu.

Metoda ověření bezpečnosti pracoviště se spolupracujícím robotem v průběhu celého pracovního cyklu je navržena v rámci doplňkové studie prováděné na Tohoku University a je popsána v závěrečné kapitole práce. Tato metoda neověřuje překročení bezpečnostních limitů pouze ve vybraných situacích, ale v průběhu celého pohybu obsluhy v pracovním prostředí robotu.

Annotation of Dissertation Thesis:

VYSOCKÝ, Aleš. *Direct cooperation of Robots with Humans*, Department of robotics, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-TU Ostrava, 98 pages, 85 figures, 12 tables, 3 supplements. Tutor: prof. Dr. Ing. Petr Novák

The dissertation thesis follows up on the cooperation between a robot and a human. This topic has recently been a significantly discussed problem in the field of industrial robotics. There are new opportunities for robotic workplace design where a robot can come into a direct contact with the operator during operation. Such cooperation brings benefits in areas where manual work was used in standard applications and shows new production capabilities. However, this technology also brings risks in regard to the possibility of collision with a moving machine.

In the introduction there are analysed the current standards which define basic concepts and ways of human-robot cooperation. Then there follows a thorough research of existing solutions and their evaluation. A survey of available technologies, safety devices and principles of collision detection shows up-to-date possibilities in the development of safe robotic workplaces.

The topic of this thesis was specified by ŠKODA AUTO a.s. company as a requirement for an implementation of this technology to the car production process. Based on requirements both for theoretical research and the real workplace development, there has arisen an opportunity for a precise design, realization and profound check of the final solution. The thesis also deals with a pre-design phase of workplace selection, setting requirements and task definition, including the realization of the project and its evaluation. The proposed methodology combines technical standards and experiences from the pilot project development and realization. This workplace is unique in the scope of application of the human-robot cooperation in the real production according to available information.

The evaluation method for robotic workplace safety during the whole operation has been proposed in an additional study done at Tohoku University and is described in the last chapter. This method does not monitor exceeding the safety limits only in certain situations but during the whole movement of the operator in the robot's working range.

Obsah

Seznam použitého značení, symbolů a zkratk.....	6
Poděkování	8
1 Úvod	9
2 Přehled současného stavu problematiky	10
2.1 Vývoj a specifika spolupráce robotu s člověkem.....	10
2.2 Příklady realizovaných pracovišť a důvody nasazení.....	13
2.2.1 Omezený zástavbový prostor	13
2.2.2 Zlepšení ergonomie	14
2.2.3 Častá změna trajektorie robotu	16
2.2.4 Zvýšení kvality.....	16
2.2.5 Odstranění monotónních operací	18
2.3 Technologie zabezpečení pracoviště s kolaborativními roboty	19
2.3.1 Nášlapná rohož.....	19
2.3.2 Optické závory	19
2.3.3 Laserové scannery	20
2.3.4 Kamerový systém	20
2.4 Senzory pro zajištění bezpečnosti na úrovni robotu	22
2.4.1 Detekce reakce od nástroje.....	22
2.4.2 Detekce kontaktu překážky s tělem robotu	23
2.4.3 Detekce reakce robotu do montážní plochy	24
2.5 Způsoby detekce kolize spolupracujících robotů	24
2.5.1 Měření zatížení motoru	25
2.5.2 Měření absolutní polohy/natočení článku	25
2.5.3 Měření momentu tenzometry.....	26
2.5.4 SEA aktuátory	27
3 Cíle disertační práce	28
4 Bezpečnostní požadavky na robotizovaná pracoviště.....	29
4.1 Formy spolupráce robotu s člověkem	29
4.1.1 Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety-rated Monitored Stop).....	29
4.1.2 Ruční vedení (Hand Guiding)	30
4.1.3 Monitorování rychlosti a polohy (Speed and Separation monitoring).....	31
4.1.4 Omezení síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládáním (Power and Force Limiting)	31
4.2 Analýza rizik.....	32
4.2.1 Riziko, nebezpečí, zdroj nebezpečí.....	32
4.2.2 Rozdělení bezpečnostních norem	33
4.2.3 Posouzení rizik	35
4.2.4 Hodnocení rizik.....	39

4.2.5	Analýza rizik pracovišť se spolupracujícím robotem	41
4.2.6	Příklad provádění analýzy rizika	42
5	Metodika nasazování kolaborativních robotů.....	45
5.1	Výběr pracoviště.....	46
5.2	Zhodnocení navrhovaného pracoviště	46
5.2.1	Obsluha pracoviště	46
5.2.2	Analýza prostoru	47
5.2.3	Analýza technologie nebo objektu manipulace	47
5.3	Předprovozní test systému.....	49
5.3.1	Doběhový čas robotu při narušení hlídané zóny.....	49
5.3.2	Nárazové síly při vybraných kolizních situacích.....	49
5.4	Uvedení do provozu	50
6	Návrh prototypového pracoviště	51
6.1	Analýza obsluhy.....	52
6.2	Analýza prostoru	54
6.3	Návrh pracoviště a výběr komponent.....	55
6.4	Popis navrhovaného pracoviště	56
6.5	Návrh bezpečnostního konceptu	59
6.6	Výsledná podoba pracoviště a změny oproti zadání.....	60
6.7	Předprovozní test systému.....	62
6.7.1	Doběhový čas robotu při narušení hlídané zóny.....	63
6.7.2	Nárazové síly při vybraných kolizních situacích.....	65
6.8	Uvedení do provozu	73
6.9	Kontrola bezpečnosti.....	74
6.9.1	Asistenční manipulátor PaDY	74
6.9.2	Metoda ověření bezpečnosti manipulátoru.....	75
6.9.3	Experimentální ověření relativní rychlosti manipulátoru vůči obsluze	78
6.9.4	Simulační prostředí pro změnu parametrů pohybu manipulátoru	83
7	Závěry	89
8	Doporučení pro další výzkum	91
9	Conclusions.....	91
10	Recommendation for further research	93
11	Reference	94
12	Vlastní publikace.....	98
13	Seznam příloh	98
	Příloha č.1 – detailní popis hodnocení operací na pracovišti.....	99
	Příloha č.2 – Přehled parametrů cobotů	101

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek

ZNAČKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
d	Rozlišení bezpečnostního skeneru	[mm]
E	Pozice koncového bodu manipulátoru	[-]
F_{\max}	Maximální nárazová síla	[N]
H	Vzdálenost skenovací roviny od země	[mm]
l	Nejkratší vzdálenost operátora od manipulátoru	[mm]
J	Jakobián manipulátoru	[-]
k	Efektivní konstanta pružnosti	$[N \cdot mm^{-1}]$
k	Bezpečnostní koeficient pro snížení relativní rychlosti	[-]
K	Rychlost přiblížení obsluhy ke stroji	$[mm \cdot s^{-1}]$
l_1	Délka prvního ramene manipulátoru	[mm]
l_2	Délka druhého ramene manipulátoru	[mm]
M	Hmotnost pohyblivé části robotu	[kg]
M	Pozice lokte manipulátoru	[-]
m_H	Efektivní hmotnost části těla v kolizi	[kg]
m_L	Hmotnost manipulovaná robotem	[kg]
m_R	Efektivní hmotnost pohybujících se hmot robotu	[kg]
P	Pata nejkratší vzdálenosti operátora od manipulátoru	[-]
q_1	Natočení prvního ramene manipulátoru	[°]
q_2	Natočení druhého ramene manipulátoru	[°]
S	Bezpečná vzdálenost obsluhy od stroje	[mm]
T	Celkový čas doběhu stroje	[s]
$t_{\text{nový}}$	Doba pohybu manipulátoru přepočítaná dle bezpečnostního koeficientu k	[s]
$t_{\text{původní}}$	Doba pohybu manipulátoru před optimalizací	[s]
$t_{\text{zrychlení}}$	Doba zrychlování manipulátoru na provozní rychlost	[s]
u	Směrový vektor ramene manipulátoru	[-]
v	Směrový vektor pozice operátora od lokte manipulátoru	[-]
$v_{\text{operátor}}$	Rychlost pohybu operátora	$[mm \cdot s^{-1}]$
$v_{\text{původní}}$	Rychlost nejbližšího bodu manipulátoru od operátora před optimalizací	$[mm \cdot s^{-1}]$
v_{rel}	Relativní rychlost	$[mm \cdot s^{-1}]$
$v_{\text{rel,lim}}$	Limitní relativní rychlost	$[mm \cdot s^{-1}]$
$v_{\text{rel,max}}$	Maximální relativní rychlost	$[mm \cdot s^{-1}]$
v_{robot}	Rychlost nejbližšího bodu manipulátoru od operátora	$[mm \cdot s^{-1}]$

$v_{\text{snížená}}$	Rychlost nejbližšího bodu manipulátoru od operátora snížená bezpečnostním koeficientem k	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
W	Pozice operátora	$[-]$
μ	Redukovaná hmotnost systému dvou hmot	$[\text{kg}]$
ω_{robot}	Úhlová rychlost kloubu robotu	$[\text{s}^{-1}]$
Bin Picking	Výběr dílu z přepravního boxu, kde díly nejsou orientovány, za pomoci robotu	$[-]$
LRF	Laser Range Finder – rovinný laserový skener	$[-]$
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj	$[-]$
OM	Objekt manipulace	$[-]$

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Petru Novákovi za podporu a přínosné náměty k práci na zajímavém tématu, a také za umožnění spolupráce s firmou ŠKODA AUTO a.s. Cením si možnost účastí na zahraničních konferencích, kde jsem měl možnost získat informace o aktuálních technologiích, a také zahraničního pobytu.

Můj dík patří firmě ŠKODA AUTO a.s., zejména Ing. Tomáši Posekanému a Ing. Petru Hynkovi za odborné vedení mé práce a podporu při návrhu a realizaci pilotního pracoviště. Tato zkušenost mi přinesla nespočet příležitostí naučit se novým věcem a seznámit se s výrobou automobilů v největší tuzemské firmě.

Děkuji svým kolegům doktorandům a zaměstnancům katedry robotiky za přátelské pracovní prostředí, spolupráci a pomoc při výzkumu. Také bych chtěl poděkovat za pomoc a motivaci při dokončování práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za soustavnou podporu v průběhu celého studia.

1 Úvod

V současné době se společnost evropských, ale i vyspělých světových zemí nachází v etapě hospodářského růstu. Ten je spojen s rostoucí poptávkou po různých produktech a rozvoji průmyslové výroby. Rychlou expanzi firem doprovází mimo jiné nedostatek kvalifikované pracovní síly. V roce 2018 se snížila v České republice míra nezaměstnanosti natolik, že nabídka pracovních míst je výrazně vyšší než počet nezaměstnaných. Úřad práce v listopadu 2018 evidoval 215010 nezaměstnaných a 323542 volných pracovních míst [1]. Produktivita práce je dle zprávy OECD v ČR podprůměrná [2] a nedosahuje ani 60 % produktivity USA nebo Německa. Jedním z řešení tohoto problému je zvýšení podílu automatizace a robotizace. Vybudování pracovišť s částečnou nebo úplnou automatizací může být hlavně pro menší firmy finančně náročné. Nejedná se pouze o nákup automatizační techniky a robotů a osvojení si údržby těchto zařízení, ale je potřeba restrukturalizace výroby dle prostorových požadavků nového pracoviště, nastavení nových procesů a bezpečnostních pokynů, a také zajištění logistiky, aby bylo pracoviště maximálně využito. Jednou z možností částečné automatizace výroby je použití spolupracujících robotů.

Spolupracující robot může být také nazýván kooperující, kolaborativní robot nebo robotický asistent. Roboty a samotná strategie je také označována německou zkratkou MRK (Mensch Roboter Kollaboration) nebo anglickou zkratkou HRC (Human Robot Collaboration). Označení Cobot je slangový výraz pro spolupracující robot, který je uzpůsoben pro možnost kolize s obsluhou, ke které může dojít v jednom ze způsobů spolupráce uvedených dále v práci jako „Omezení výkonu a síly“. Slovo cobot se ale stalo oblíbeným a je používáno pro jakýkoliv robot určený pro spolupráci robotu s člověkem. Tyto roboty mohou pomoci při částečné robotizaci výroby. Výhodou je možnost nasazení robotu do stávajícího pracoviště, a tím výrazné snížení nákladů. Vhodně zvolená aplikace se spolupracujícím robotem zvyšuje efektivitu, kvalitu a snižuje zátěž kladenou na obsluhu. V prostoru, kde může dojít ke kontaktu člověka s pohyblivým se strojem, musí být kladen velký důraz na bezpečnost.

Na trhu je dostupná řada robotů a dalších doplňkových zařízení, jako jsou koncové efekторы, silové sensory, kamerové systémy, bezpečnostní systémy a další. Správný návrh pracoviště má mnohem zásadnější vliv než u pracovišť s konvenčními roboty. Konstruktor je schopen korektním vyhodnocením aplikace a s použitím vhodných zařízení významně ovlivnit náklady, vypracováním analýzy rizik mohou být nastaveny efektivní procesy a zaručena bezpečnost.

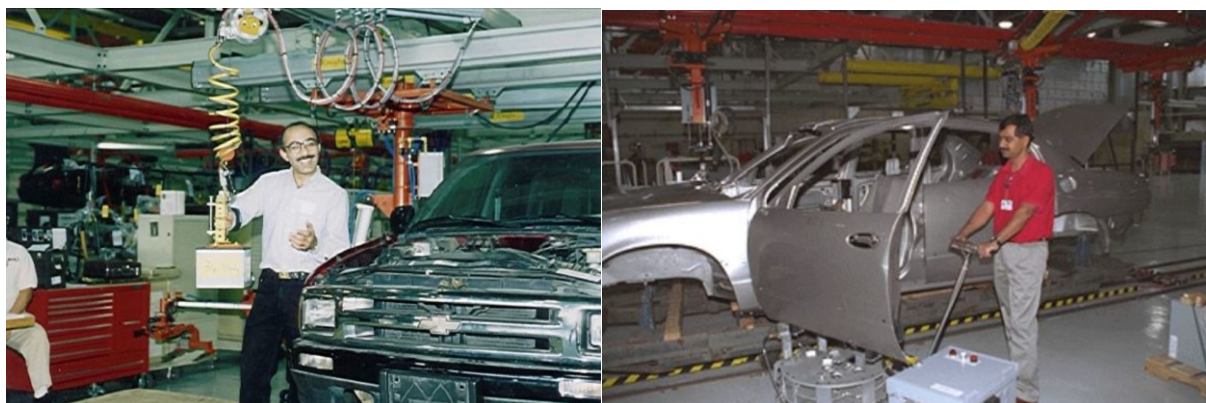
Práce je členěna do šesti hlavních kapitol. V úvodní části je popsána motivace k řešení problematiky. Kapitola číslo dvě obsahuje analýzu současných technologií, zařízení a postupů využívaných v oblasti kolaborativní robotiky. Součástí je také analýza stávajících pracovišť se spolupracujícími roboty. Ve třetí kapitole jsou definovány cíle práce. Kapitola čtyři obsahuje bezpečnostní požadavky na pracoviště s coboty a analýzu možných rizik. Pátá sekce nese metodiku návrhu pracovišť s kolaborativními roboty, dále ověřenou v kapitole šest na realizovaném pilotním pracovišti. V závěru byl proveden návrh metody ověřování bezpečnosti provozu robotu po celou dobu pracovního cyklu.

2 Přehled současného stavu problematiky

2.1 Vývoj a specifika spolupráce robotu s člověkem

Historie kolaborativních robotů sahá do roku 1996, kdy byly základy položeny profesory J. Edwardem Colgatem a Michaelem Peshkinem z Northwestern University a Homayoonem Kalzeronim z UC Berkeley ve spolupráci s firmou General Motors. Zde pracoval na pozici průmyslového inženýra Prasad Akella, který se potýkal s problémy s ergonomií. Impulsem pro vývoj zařízení bylo zlepšení ergonomie na montážních linkách, kde pracovníci musí manipulovat s těžkými předměty, což má za následek nemoci z povolání. Ve firmě GM byly nasazovány a testovány nejprve kompenzátory (balancéry) (Obr. 1), aby obsluha nezvedala celou hmotnost montovaných komponent. Byly proto vyvinuty závěsné kompenzátory a vozíky s nastavitelnou výškou pro instalaci dveří.

Pro některé aplikace, například zástavba palubní desky, ale jednoduché kompenzátory gravitace přestaly být dostačující a bylo zapotřebí vyvinout složitější zařízení – inteligentní asistenční zařízení. Z počátku tato zařízení neměla pohon, který by inicioval pohyb manipulovaného objektu, pohyb byl iniciován pouze obsluhou. Roboty fungovaly jako inteligentní kompenzátory gravitace a sil. Inteligentní znamenalo, že pohyb mohl být omezen řídicí jednotkou, aby se manipulovaná součást pohybovala ve stanoveném prostoru. Název těchto zařízení – programovatelné omezující zařízení – vypovídá o funkci stroje. Počítač vytvořil virtuální roviny, které omezily prostor pohybu a pracovník mohl manipulovat se součástí s vyšší přesností a menší námahou díky kompenzaci.



Obr. 1 Kompenzátory hmotnosti[3]

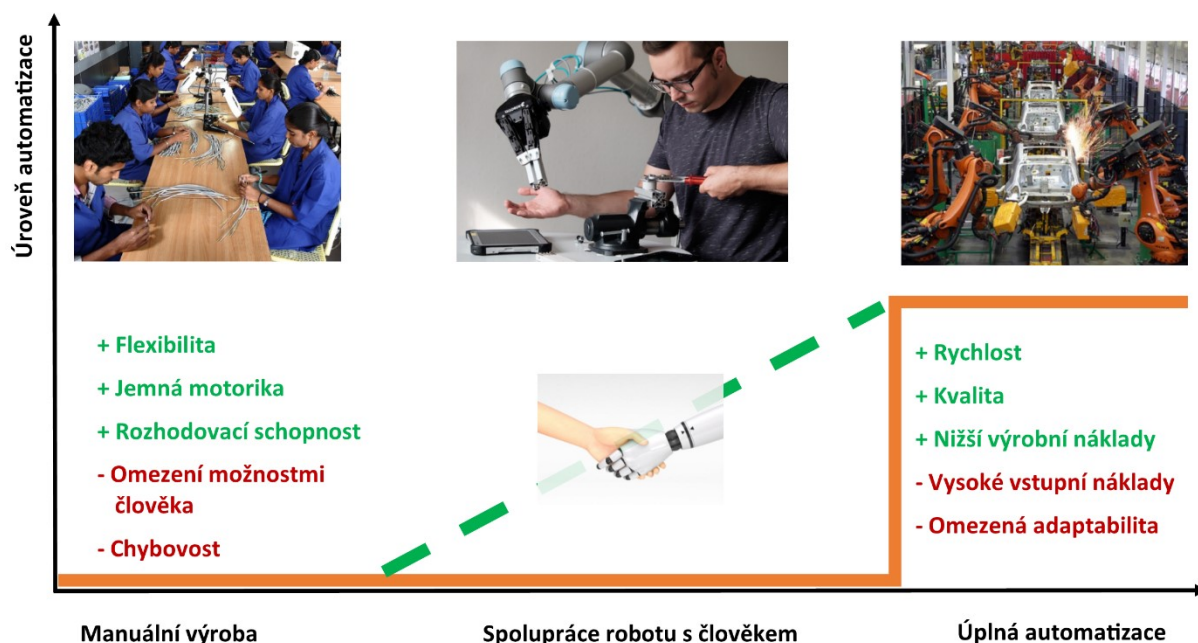
Postupně byly přidány pohony, aby robot kromě vyvažování sám mohl vykonávat pohyb, ale systém tak musel být rozšířen i o senzory, aby nedošlo k nebezpečné situaci. Po prvních úspěších a zájmu ze strany lidí pracujících na montážních linkách se touto problematikou začaly zabírat velké robotické společnosti jako FANUC nebo KUKA až po dnešní zapojení všech robotických firem a vznik nových specializovaných firem. Mnoho koncepcí vzniklo výzkumem na univerzitách a na německých institutech DLR a Fraunhofer. Příkladem je pak firma Universal Robots založená dánskými studenty nebo robot KUKA LBR iiwa vyvinutý na institutu DLR. Kromě robotů samotných muselo dojít k vývoji nových technologií a senzorové a pohonné techniky.

Spolupracující roboty jsou v rámci konceptu Průmysl 4.0 aktuálním trendem v oblasti jak průmyslové, tak servisní robotiky. Cílem této inovativní strategie je umožnit přímou bezpečnou spolupráci robotu a člověka. Mezi manuální výrobou a úplnou automatizací se nachází oblast, ve které se člověk dostává do kontaktu se strojem. Dlouho byla tato oblast využívána omezeně. Z důvodu bezpečnosti mohl stroj pracovat, pouze pokud se člověk nacházel mimo jeho pracovní prostor. Spolupracující robotika vytváří nové možnosti součinnosti člověka a stroje. Člověk s robotem sdílí společný pracovní prostor a robot

pomáhá člověku s neergonomickými, opakujícími se nebo jinými nepříjemnými, či nebezpečnými pracemi. Robot pomocí pokročilé sensoriky kontroluje své pohyby, aby svým působením neomezil, a hlavně neohrozil člověka. Otázka bezpečnosti je u této technologie klíčová.

Robot určený pro fyzickou interakci a spolupráci s lidmi nemusí být konstrukčně odlišný od standardních průmyslových robotů, které splňují bezpečnostní normy ČSN EN ISO 10218, musí být doplněny další bezpečnostní prvky. Doporučení pro spolupracující roboty jsou v technické specifikaci ISO/TS 15066 vydané v roce 2016. Tato specifikace byla dlouho očekávaná, protože do jejího vydání bylo možné nahlížet na tyto roboty pouze z pohledu normy ČSN EN ISO 10218, která se pouze v jedné kapitole zmiňuje o možnostech spolupráce, definice je však nedostačující.

Roboty jsou robustní, rychlá a přesná zařízení, která odvedou práci rychleji a lépe než člověk, proč tedy zachovávat lidský faktor vnášející chybovost a nasazovat spolupracující robot? Některé operace je potřeba přizpůsobit podle aktuální situace, roboty nejsou schopny přemýšlet, pouze vyhodnocují naprogramované příkazy a vykonávají naučené pohyby, robot je tedy omezen svým programem. Manipulační roboty bývají konstruovány se šesti až sedmi stupni volnosti, horní končetina člověka jich má okolo třiceti, z toho vyplývá druhé omezení nasazení těchto zařízení – jemná manipulace s velkým rozsahem pohybů. Existují tedy dvě bariéry mezi operacemi vykonávanými člověkem a robotem. Kooperace člověka s robotem tyto bariéry prolomuje a využívá výhod strojů v náročných aplikacích s nutnou přítomností člověka.



Obr. 2 Pozice spolupracujících robotů

Dnešní přístup k průmyslové robotice je takový, že robot nahrazuje člověka v činnostech, které jsou neergonomické. Může se jednat o manipulaci s těžkými objekty nebo manipulaci v pro člověka nepřírodných polohách, dále pak úlohy nebezpečné, jako je manipulace s toxickými, či žhavými objekty. Roboty nahrazují člověka v operacích, které jsou monotónní a často se opakují nebo vyžadují vysokou přesnost.

Od spolupracujícího robotu je očekávána reakce na přítomnost cizího předmětu nebo člověka v jeho pracovním prostoru nebo kolizi s tímto objektem – viz Obr. 3. Reakce se s pokročilostí systému může lišit. Od výstrahy (1) a zastavení robotu (2), které jsou z bezpečnostního hlediska nezbytné, přes

inteligentnější formy, jako je poddajnost (3) a ovlivnění pohybu odstrčením, až po úplnou eliminaci kolize a přizpůsobení trajektorie pohybu robotu (4).



Obr. 3 Reakce robotu na člověka

Specifika robotů určených pro spolupráci s člověkem jsou:

- design splňující bezpečnostní požadavky
- jednoduché programování, možnost učení
- možnost univerzálního použití a rychlá změna výroby
- menší nároky na prostor než aplikace s konvenčními roboty
- nižší náklady na automatizaci průmyslové aplikace
- možnosti interakce s operátorem
- Cloudová řešení – návaznost na Průmysl 4.0

Spolupracující roboty a další periferní zařízení zvyšující bezpečnost robotických pracovišť nejsou určeny jako úplná náhrada stávajících technologií. Kolaborativní robotika rozšiřuje portfolio robotických aplikací v průmyslu a přináší několik zásadních výhod:

- Ze socioekonomického hlediska nasazení spolupracujících robotů přináší lepší konkurenceschopnost firem v porovnání se zeměmi s velmi levnou pracovní silou, firma se tak může více zaměřit na požadavky zákazníka a nabízet produkt levněji.
- Opakovatelná přesnost robotu a kontinuální provoz zajistí lepší kvalitu a nižší požadavky na další zpracování a kontrolu.
- Robot může některé procesy urychlit a upravit podle požadavků, dochází tak ke zvýšení produkce.
- Omezením nepříjemné, opakující se a nudné práce se sníží zátěž na člověka, která může ústít v nemoc z povolání. Zvýší se také motivace a kvalita práce. Neplatí, že robot přebírá veškerou práci. S vyšším stupněm automatizace je potřeba vyšší kvalifikace pracovníků obsluhujících zařízení.
- Se zátěží na pracovníka souvisí i ergonomie prováděných úkonů. Vylepšením ergonomie a pracovního prostředí dochází opět k redukci pracovních úrazů.
- Nebezpečné situace většinou vznikají obcházením bezpečnostních předpisů a zjednodušováním postupů. Při nasazení bezpečnějších technologií se riziko úrazu snižuje.

2.2 Příklady realizovaných pracovišť a důvody nasazení

Spolupracující roboty mohou být použity samostatně. V ideálním případě přivezeny na mobilní platformě do místa výroby, spuštěny a zde provozovány. V momentě potřeby na jiném místě je robot přemístěn a provozován jinde. Jediným nutným rozšířením je koncový efektor robotu případně kamerový systém.

Většina pracovišť počítá s robotem implementovaným do výrobní linky. Příkladem využití cobotů mohou být následující situace:

2.2.1 Omezený zástavbový prostor

Omezený zástavbový prostor je častým problémem při integraci do stávajícího zařízení nebo potřeby automatizace v menší místnosti. Využitím spolupráce robotu s člověkem ve formě monitorování rychlosti a vzdálenosti je pracovní prostor robotu monitorován bezpečnostním skenerem nebo jiným prvkem detekce přítomnosti obsluhy a nemusí být využity pevné bariéry, kterými by byl znemožněn průchod pracovištěm. Celé pracoviště tak má menší zástavbové rozměry, protože část pracovního prostoru robotu je využívána k průchodu kolem zařízení nebo například k logistickým účelům. V tomto případě robot zastaví v přítomnosti obsluhy v jeho dosahu.

Problém omezeného prostoru lze vyřešit i omezením sil a výkonu. Je tedy potřeba využít robot, který zvládne detekovat a následně zareagovat na kolizi. Prostor není potřeba hlídat bezpečnostním zařízením a robot je stále v pohybu i v případě přítomnosti obsluhy kolem něj. Parametry možné kolize musí být v mezích bezpečnosti zařízení, které jsou popsány dále. I když prostor není potřeba hlídat bezpečnostním zařízením, je vhodné jej v rámci optimalizace na pracoviště zařadit. Robot může v nepřítomnosti obsluhy pracovat ve standardním módu, v přítomnosti obsluhy pak zpomalí, aby splňoval limity.

Příkladem může být nasazení robotu KUKA LBR iiwa ve vrchlabském závodě ŠKODA AUTO. Robot je umístěn do uličky mezi výrobními linkami. V této uličce musí být zajištěn průchod a konvenční robot by překážel. Robot se zastaví při kolizi a při odstranění překážky pokračuje ve své práci.



Obr. 4 Robot KUKA ve ŠKODA AUTO Vrchlabí[4][5]

Důvodem nasazení robotu byla automatizace monotónní operace (vkládání malých pístků) a zvýšení kvality (přesné vkládání). Na pracovišti tedy nedochází k interakci obsluhy s robotem, pouze sdílí společný pracovní prostor při průchodu kolem pracoviště a při pravidelné kalibraci zařízení obsluhovaného robotem.

Dalším příkladem nemusí být aplikace robotu ve stísněných prostorech, ale v místech, kde je potřeba zajistit průchod obsluhy v celém rozsahu pracovního prostoru robotu. Takovým příkladem je umístění robotu přímo na montážní linku. Robot KUKA LBR iiwa ve výrobním závodě AUDI Győr má na svém konci skenovací hlavu pro kontrolu šířky spáry mezi jednotlivými plechy.



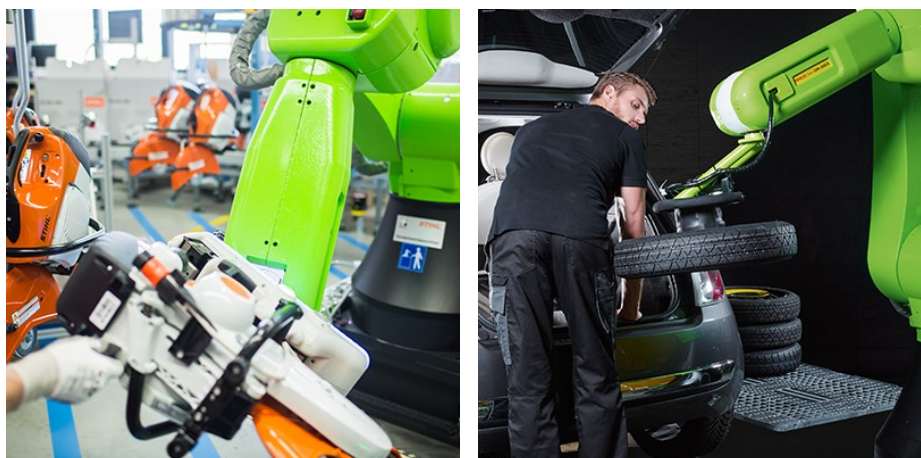
Obr. 5 Cobot v AUDI Győr [6]

Robot opět neinteraguje s obsluhou, sdílí však společný pracovní prostor a v případě kolize se robot zastaví.

2.2.2 Zlepšení ergonomie

Zlepšení ergonomie a omezení zvedání těžkých břemen je častým důvodem automatizace/robotizace pracoviště. Někdy je lepší zcela přepracovat pracoviště a operaci provádět výhradně robotem, mnoho situací však vyžaduje přítomnost obsluhy. Zcela vyloučit lidský faktor může být příliš nákladné v mnoha situacích dokonce úplně nemožné. Robot může vykonat manipulaci s předmětem, obsluha následně provádí například montáž, optickou kontrolu, kontrolu hmatem nebo úpravy. Tyto činnosti už nemají negativní účinky na lidské tělo jako samotná manipulace.

Příkladem manipulace těžkého břemene robotem je aplikace ve firmě STIHL, kde se vyrábí motorové nářadí. Obsluha provádí montáž a kontrolu z různých stran vyráběného stroje a robot díl odebere a pak natáčí do polohy, kterou obsluha potřebuje. Po dokončení prací robot díl založí.



Obr. 6 Robot FANUC CR-35iA ve firmě STIHL a při nakládání rezervního kola [7][8]

Jiným příkladem je manipulace a vkládání rezervního kola do zavazadlového prostoru auta. Robot díky kamerovému systému sám nabere kolo a připraví obsluhu do polohy za autem. Obsluha potom pomocí ovládacího prstence na efektoru umístí rezervní kolo na své místo.

V případě ergonomie nemusí jít pouze o zvedání těžkých břemen, ale také o práci v nepřírodných polohách, například nad hlavou. Při práci nad hlavou je namáhána krční páteř, záda, a i samotné paže, které musí být zvednuté. V takové poloze i zvedání menší zátěže je pro člověka nepříjemné. Robot tedy může plnit funkci inteligentního balanceru a obsluha pouze naviguje nástroj do správné pozice. Takový příklad je na montážní lince ve firmě FORD.



Obr. 7 Robot KUKA ve firmě FORD (vlevo)[9] a UR ve firmě VW[10]

Jiným příkladem na vylepšení ergonomie pracoviště je vkládání součástek do bloku motoru v závodě na výrobu komponent VW Salzgitter. Robot zde pomáhá obsluze s vložením žhavicích svíček ze zadní strany, kam by se obsluha musela nahnout přes hliníkový blok.

AUDI využívá robot MRK Systeme pro podávání součástky obsluze. Tato operace nazývaná PART4you vybírá podtlakovým uchopením nádržky kapaliny do ostřikovače z palety umístěné na zemi a podává je operátorovi na lince, který tak nemusí jít do předklonu, aby si nádržku vybral z kontejneru.



Obr. 8 Robot MRK Systeme v AUDI[11]

Tato poslední aplikace byla nejspíš vytvořena z důvodu otestování technologie. Situace by byla řešitelná například zvýšenou polohou zásobníku. Je vždy tedy vhodné přemýšlet o způsobech, jak jednoduše odstranit problém s ergonomií. Pokud byl záměr pouze vytahovat nádržku z kontejneru

bude řešení s robotem, kamerovým systémem a dalšími bezpečnostními zařízeními v tomto případě zbytečně nákladný a předimenzovaný.

2.2.3 Častá změna trajektorie robotu

Další vhodnou aplikací mohou být aplikace charakteristické změnami v pohybech robotu. Díky možnosti změny trajektorie učením může být robot v módu ručního navádění přesunut do nové pozice a ta je přepsána v programu. Tento případ má své limity například v koncovém efektoru, který nemusí být schopen odebírat různorodé součástky. Použitím univerzálního efektoru, více efektorové hlavy, podtlakového zařízení nebo jen sjednocením uchopovacích míst na manipulovaném dílu může být tento nedostatek odstraněn.

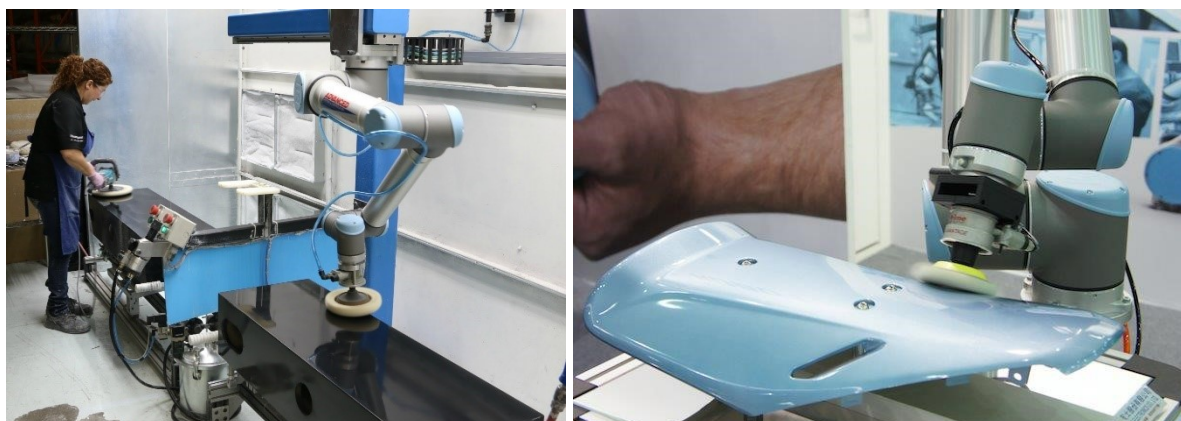
Typickým příkladem je obsluha obráběcího stroje robotem. Robot odebírá ze vstupního zásobníku díl a zakládá ho do stroje. Po obrobení dílu jej robot odebere a odloží do výstupního zásobníku. Robot může díl navíc například podrobit kontrole, otočit v obráběcím zařízení nebo provést další technologické operace. Běžně robot v hnízdivé struktuře obsluhuje i více strojů najednou.



Obr. 9 Roboty UR (vlevo)[12] a Sawyer provádějící obsluhu obráběcího centra[13]

2.2.4 Zvýšení kvality

Stejně jako u konvenčních robotů, nasazením spolupracujícího robotu docílíme stejných výsledků v každém opakování operace (toto platí při správném nastavení a seřízení robotu a dalších faktorech ovlivňujících například kvalitu úchopu součásti). Zlepšení kvality může nastat i v technologické operaci. Cobot může vykonávat technologické operace jako leštění, nanášení lepidla a dostupná je i sada pro obloukové svařování.



Obr. 10 Aplikace leštění povrchů s roboty UR[14][15]

Pokud má robot na koncovém efektoru silový snímač, dokáže aplikovat stále stejný přítlak leštícího kotouče. Spolupracující roboty mohou nastavenou sílu aplikovat i v rámci vlastních senzorů. Snímač síly ale výsledky výrazně zpřesňuje.

Souvislého přítlaku po definované dráze využívá aplikace nasazování těsnění do dveří ve výrobním závodu firmy BMW ve Spartanburgu. Robot s aplikační hlavou nasadí těsnění na hranu, kterou objede dokola a nasadí tak těsnicí pásku.



Obr. 11 Aplikace těsnění v BMW Spartanburg[16][17]

Vhodnou technologií pro spolupracující roboty je aplikace lepidla nebo těsnícího tmelu. Nástroj pro aplikaci může být zakrytován, obsluha se potom může pohybovat přímo v pracovním prostoru robotu, provádět inspekci a následně díl odebrat.



Obr. 12 Aplikace lepidla při zástavbě skla (vlevo) a sada pro obloukové svařování[18][19]

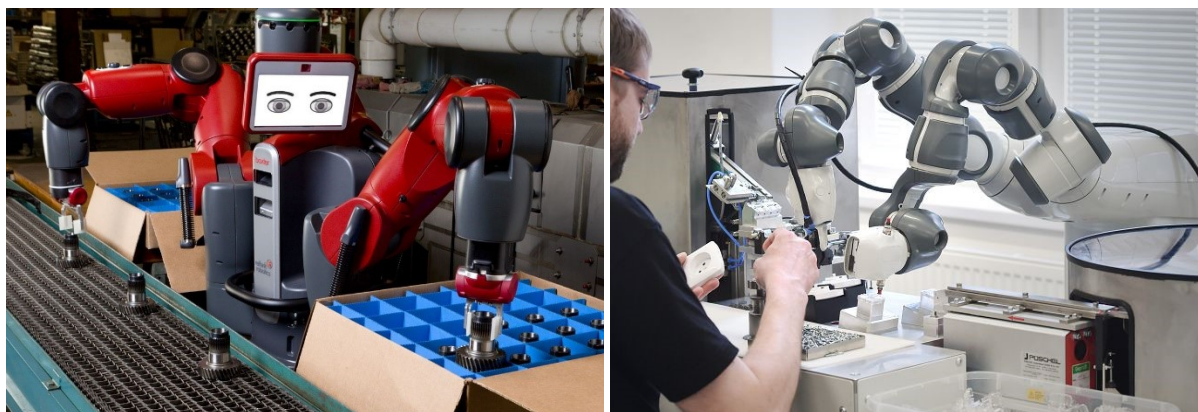
Méně vhodnou aplikací pro spolupráci robotu s člověkem je možnost nasazení technologie obloukového svařování. Zde je možné využít vlastností robotu jako je jeho menší požadavky na zástavbový prostor, dále pak možnost učení trajektorie nebo zastavení při kolizi se svařovaným dílem. Pracovní prostor musí být zabezpečen z důvodu použití nebezpečné technologie. Tato aplikace je hodnocena spíše než spolupráce robotu s člověkem jako využití spolupracujícího robotu ve standardní robotické aplikaci.

Mezi další technologie, které mají vyšší požadavky na zabezpečení může být řezání, vrtání a další způsoby třískového obrábění přímo robotem. Dále nýtování a nastřelování součástí jsou technologie, které mohou být prováděny ne přímo robotem, ale na stacionárním zařízení, kde robot vykonává pouze manipulaci. Nebezpečná technologie se potom nachází na pracovišti v zabezpečeném boxu, kde je sledován přístup obsluhy například světelnou závorou.

2.2.5 Odstranění monotónních operací

Omezení opakujících se operací je dalším důvodem robotizace. Částečně souvisí tento problém s ergonomií i kvalitou. Pokud operátor vykonává pouze jednoduché operace odebrání a vložení na místo jiné nebo spojování několika součástek dohromady, je to vhodná aplikace pro využití robotu. Na lince pak pracoviště s roboty mohou být zařazena pouze na problémová místa, další pracoviště zůstávají s operátory.

Příkladem mohou být aplikace s „dvourukými“ roboty. Robot Baxter může být zařazen do výrobního procesu a vykonávat například paletizaci a inspekci pomocí kamery umístěné v zápěstí robotu.



Obr. 13 Robot Baxter (vlevo), robot YuMi při montáži zásuvek[20][21]

Jiným příkladem je opět dvouruký robot YuMi, který kompletuje elektrické zásuvky. V této aplikaci je důležitý i faktor ergonomie, kdy vkládání některých součástek je náročné na zápěstí a prsty operátora. Operátor vloží do přípravku tělo zásuvky, robot pak vloží kovové součástky. Obsluha nakonec díl odebere.

Monotónní prací je i zastřihávání přebytečné kabeláže při výrobě elektromotorů. Robot manipuluje s dílem do základací stanice a následně pomocí nůžek zastříhne kabely. Výrobek potom vrátí zpět operátorovi.



Obr. 14 Robot UR zastřihující kabely[22]

Z důvodu použití nebezpečné technologie – stříhání robotem – je pracoviště odděleno přepážkou, kde vozík na lineárním vedení posouvá díl mezi odkládacím místem operátora a odebracím místem robotu.

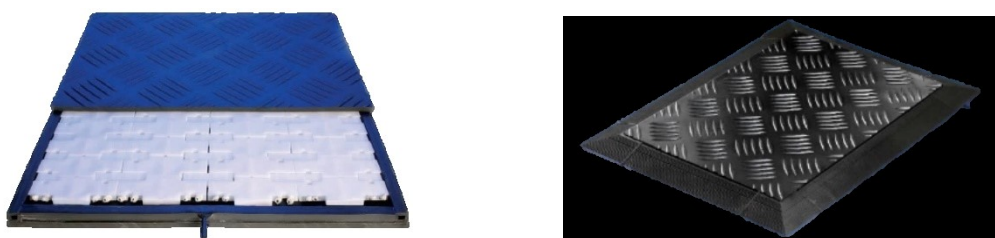
2.3 Technologie zabezpečení pracoviště s kolaborativními roboty

Elementární podmínkou zajištění bezpečnosti na pracovišti je úspěšná detekce přítomnosti osoby nebo cizího předmětu v oblasti, kam dosáhnou pohybující se části stroje. Jak bylo zmíněno v úvodu, pro spolupráci robotu s člověkem je přístup člověka na pracoviště žádoucí, takže zde nebudou uvedeny pevné mechanické zábrany ve formě plotů a dveří. Neznamená to, že by nebyly využitelné u tohoto typu pracovišť. V některých případech je vhodné omezit přístup například z některé strany, kde není potřeba přistupovat k zařízení, pevnou zábranou.

2.3.1 Nášlapná rohož

Nejjednodušším způsobem detekce přítomnosti objektu v prostoru je elektromechanický taktilní snímač. V případě průmyslových pracovišť jde o nášlapné bezpečnostní rohože. Principem nášlapných rohoží je matice mechanických taktilních spínačů, které jsou propojeny v sériovém zapojení. Při zatížení (sešlápnutí) rohože dochází k okamžitému rozpojení elektrického obvodu a bezpečnostní vstupy stroje tento signál vyhodnotí.

Hlavní nevýhodou těchto bezpečnostních zařízení je jejich nízká flexibilita a malá možnost dynamické změny. Bezpečnostní zóny pracoviště musí být navrženy již při návrhu pracoviště. Při změně pozic strojů musí být nevratně upraven tvar nebo celá rohož vyměněna. Problémem je také pokud je potřeba umístit na pracovišti objekt do místa, kde se nachází nášlapná rohož. Při zatížení je obvod trvale rozepnut a vyhlášena chyba.



Obr. 15 Příklady nášlapných rohoží[23]

2.3.2 Optické závory

Dalším typem jednoduchých senzorů pro zajištění pracoviště jsou optické závory viz Obr. 16. Optické závory pracují na principu emise světla, jeho průchodem prostředím a následnou detekcí. Elektrický obvod je rozpojen, pokud přestane dopadat na fotocitlivý snímač paprsek vysílaný vysílačem, to je, když se mezi vysílač a přijímač dostane cizí objekt, který paprsek přeruší. Světelné závory mohou být ve formě jednotlivého fotoelektrického senzoru s jedním paprskem, ale častěji je využíván světelný závěs, což je série paprsků vytvářející detekční stěnu. Montážní poloha těchto zařízení může být jak vertikální, kdy je detekován vstup na pracoviště nebo například natažení ruky do pracovního prostoru robotu. Horizontální a šikmá montážní poloha může detekovat přítomnost obsluhy na pracovišti. U navrhování umístění těchto senzorů je důležité, aby při narušení pracovního prostoru byla stále dostupná informace (rozpojen bezpečnostní obvod) a nenastala situace, kdy sice obsluha projde bezpečnostní závorou (signál indikuje narušení prostoru), ale následnou přítomnost v zabezpečeném prostoru už nejde zjistit.

Výhody optických závor vycházejí opět z jejich jednoduchosti. Oproti nášlapným rohožím může být detekováno narušení prostoru nejen horizontálně, ale i vertikálně. Možnost využití soustavy zrcadel umožňuje snímat nejen v jedné rovině, ale například jak přední, tak boční přístupy do pracovního prostoru.



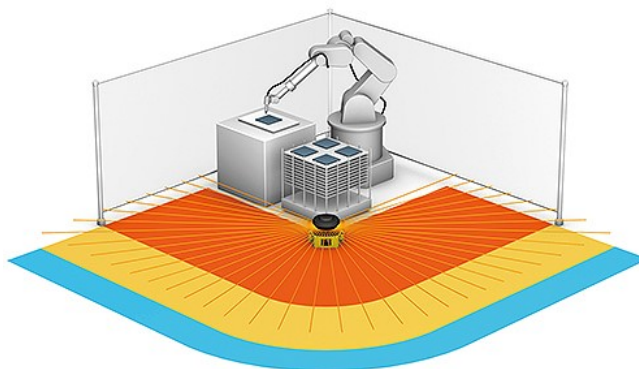
Obr. 16 Zabezpečení pracoviště optickou záclonou[24]

Nevýhody jsou podobné jako u nášlapné rohože v nízké flexibilitě při úpravách detekovaného prostoru a další nevýhody vychází z optického principu zařízení. Závory může ovlivnit přímé světlo ze slunce dopadající na zařízení a také znečištění zařízení.

2.3.3 Laserové scannery

Pokročilejším řešením zabezpečení pracoviště je bezpečnostní laserový scanner někdy nazývaný LiDAR viz Obr. 17. Laserový scanner pracuje na principu odrazu světelného paprsku od detekovaného objektu. Scanner pomocí jednoho laserového paprsku a rotujícího zrcátka detekuje objekty ve 2D prostoru v běžném rozsahu 270° a do vzdálenosti 3 m v bezpečnostní zóně a 10 m v zóně varovné. Tyto parametry se liší podle výrobce.

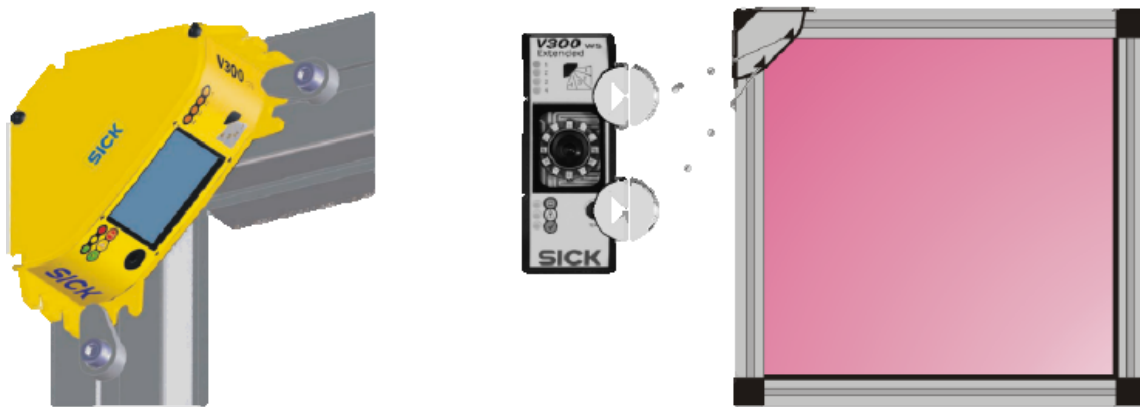
Zařízení měří vzdálenost překážky pomocí výpočtu z doby letu paprsku od vysílače k přijímači a rychlosti světla. Detekovaný prostor se dá rozdělit na zóny, které mohou být bezpečnostní – zastavení/zpomalení pracoviště nebo varovné pro signalizaci možného nebezpečí. Tyto zóny mohou mít různý tvar a velikost. Stejně jako závory může funkci senzoru ovlivnit přímé světlo ze slunce dopadající na zařízení a také znečištění zařízení.



Obr. 17 Zóny pracoviště sledované rovinným bezpečnostním skenerem[25]

2.3.4 Kamerový systém

Kamerové systémy pro zajištění bezpečnosti lze rozdělit do několika kategorií. Nejjednodušším kamerovým řešením jsou kamery pro hlídání definovaného prostoru, jako je například zakládací okno nebo pracovní prostor ohýbačky. Pro tato řešení jsou vyvinuta specializovaná zařízení. Bezpečnostní kamera od firmy Sick (Obr. 18) je instalována do rohu sledovaného otvoru (okno/dveře), na protější strany je nalepena reflexní páska. Systém dokáže podle velikosti otvoru detekovat předměty s minimální velikostí od 20 mm. Tento systém má podobnou funkci jako světelné záclony, výhodou je ale menší prostor nutný k instalaci a větší odolnost vůči znečištění. Snímaný prostor může být rozdělen na několik snímaných zón v zorném úhlu kamery.



Obr. 18 Kamerový systém pro sledování vstupních otvorů[26]

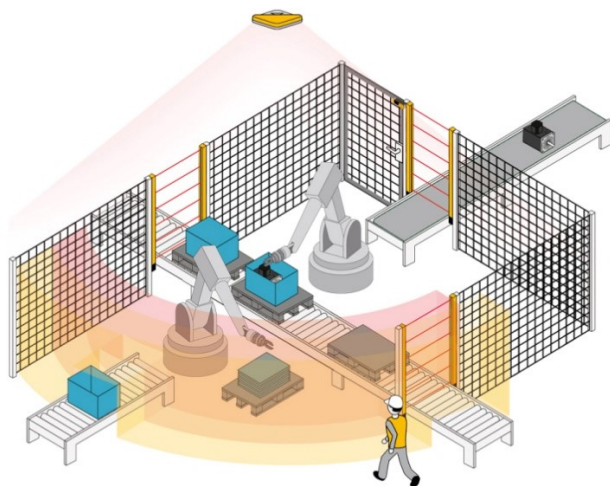
Dalším řešením je kamerový systém od firmy Pilz, který je určen pro lisy, a ohýbačky viz Obr. 19. Senzor kontroluje prostor mezi nástroji a okamžitě dá povel k zabrzdění stroje v případě vstupu cizího předmětu do prostoru mezi vysílačem a přijímačem. Systém je primárně navržen pro výše zmíněná výrobní zařízení. Princip je možné využít i u jiných zařízení, jako například kontrola odebracího/zakládacího místa robotu. Kde je také přesně definovaná scéna a operace odebrání/zakládání.



Obr. 19 Kamerový systém pro snímání výrobního prostoru[27]

Nejpokročilejším a nejsložitějším systémem pro zajištění bezpečnosti na pracovišti je 3D kamerový systém. Pomocí 3D kamery zavěšené nad pracovištěm jsou sledovány definované prostorové zóny. Zóny mohou být definovány podobně jako u laserového scanneru, nejsou ale pouze ve snímací rovině senzoru, ale zóna může být definována od podlahy až po zadanou výšku. Senzor tak může nahradit několik scannerů a světelných bran, které by byly standardně potřeba pro zajištění bezpečnosti pracoviště. Kamerový systém SafetyEYE od firmy Pilz (Obr. 20) například může snímat až 72 m² a nahradit oplocení v místech, kde je potřeba volný prostor. Zóny jsou definovány v řídicím softwaru, takže mohou být jednoduše změněny.

Zóny mohou být také určeny časově. Přítomnost cizího objektu ve vybrané bezpečnostní zóně je vyhodnocována například, pouze pokud je stroj otevřen, pokud jsou dopravníky v pohybu nebo pokud je robot aktivní. Umístěním kamery nad pracoviště je zajištěna vyšší odolnost vůči mechanickému poškození zařízení a snížení možnosti znečištění.



Obr. 20 Sledování pracoviště 3D kamerovým systémem[28]

V souvislosti s dynamickým nastavováním zón je dobré použít vhodnou signalizaci, aby obsluha pracoviště věděla, kam zrovna může vstoupit. Nejjednodušší signalizace je pomocí majáků, které rozsvěcováním různých barev informují o přístupnosti zóny. Detailnější informaci o dané zóně může poskytnout světelný pás instalovaný na podlahu nebo hranici vymezené zóny. Aby byla zachována dynamická proměnlivost hranic zón, je možné použití promítacího zařízení a vykreslovat (světelným obrazcem) hranici detekovaného prostoru.

2.4 Senzory pro zajištění bezpečnosti na úrovni robotu

V některých případech nemusí být dostačující využití pouze konvenčních bezpečnostních prvků. Důvodem může být žádaná interakce s robotem nebo potřeba přístupu do pracovního prostoru robotu v době jeho aktivity. V těchto případech může dojít i k neočekávané kolizi stroje s člověkem, která je nebezpečná. Konvenční roboty nejsou schopny detekovat menší kolize, ale až kolize, kde dojde k přetížení pohonů. Tyto kolize mohou člověku způsobit těžká i smrtelná zranění.

Firmy FANUC, MRK Systeme nebo Bosch nabízejí upravené standardní roboty pro využití na otevřených pracovištích. Základem úpravy jsou pasivní prvky pro zakrytí hran a odstranění mezer, kde by mohlo dojít k přiskřípnutí. Toto krytí je zpravidla měkký pěnový potah.

2.4.1 Detekce reakce od nástroje

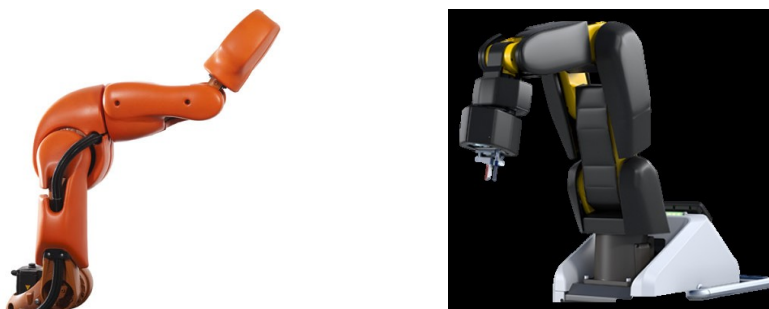
Všechny spolupracující roboty jsou certifikovány jako „bezpečné“ od paty robotu po jeho výstupní přírubu. Přidáním nástroje, jakožto periferního zařízení, vzniká už robotické zařízení a bezpečnost tohoto celku musí posoudit zhotovitel aplikace. Pokud robot narazí nástrojem do cizího předmětu nebo sám do sebe, musí tuto kolizi zaznamenat. Vhodné zařízení k tomuto účelu je snímač momentu a síly. Senzor zaznamenává reakce od nástroje do výstupní příruby. Zařízení vyhodnocuje síly ve třech směrech kartézského systému a také krouticí momenty okolo těchto směrů.



Obr. 21 Snímač síly a momentu mezi robotem a nástrojem[29]

2.4.2 Detekce kontaktu překážky s tělem robotu

Konvenční roboty mají většinou celokovové tělo, někdy s ostrými hranami nebo jinými nebezpečnými výstupky. Aby byl robot schopen pohltit část nárazové energie a nepřenášet ji do překážky, jsou roboty opatřeny pasivními bezpečnostními prvky, jako je měkký pěnový návlek. Samotný návlek nezaručí bezpečnost. Pokud by nedošlo k přetížení pohonů, robot by pokračoval v pohybu po naprogramované dráze. V pasivním prvku musí být tedy zakomponována sensorika schopná vyhodnotit kolizi.



Obr. 22 Krytí těla robotu měkčeným návlekem[30][31]

Kolize těla robotu s překážkou může být detekována při kontaktu obou těles nebo predikována dříve, než ke kontaktu dojde. Predikce je realizována vytvořením detekčního pole kolem robotu. Kapacitní senzory jsou umístěny pod krycí vrstvou pasivního chrániče a detekují přítomnost cizího objektu v okolí robotu. Pro pokrytí celé plochy ramene by bylo potřeba velké množství senzorů. Z tohoto důvodu jsou senzory využívány jen například na koncových částech v blízkosti nástroje, které se pohybují nejrychleji. Možným řešením by byl návlek/nástřík z vrstveného kapacitního materiálu, ale zatím není v nabídce robotických firem, ale pouze jsou dostupné dílčí experimenty a prototypy.

Stabilnějším řešením je detekce kolize při kontaktu. Ta je vyhodnocována pomocí taktilních snímačů v ochranném plášti robotu. Jednodušším řešením je několik snímačů umístěných po těle robotu. Každý snímač může vyhodnocovat dotekovou zónu na robotu. Kvalita kolizních dat záleží na počtu a rozmístění čidel. Další variantou kromě jednotlivých čidel je plošný taktilní snímač pracující na principu nášlapných rohoží. Výhodou plošného snímače je stejná kvalita dat na celém rozsahu měřicí mřížky.



Obr. 23 Taktilní návlek robotu[32]

Alternativou ke kapacitním sensorům by mohl být například optický senzor. Na delších částech robotu by se na konce umístily prstence se vsazenými optickými senzory a soustavou zrcátek, které by vytvořily neviditelný detekční válec ze světelných paprsků. Před kolizí by překážka nejprve přerušila světelný válec a tím vyvolala zastavení robotu. Tento návrh by ale musel být zkombinován s jinými bezpečnostními prvky v tvarově složitějších oblastech, například kloubech a v místech prstenců, které by vystupovaly mimo detekční válec.

2.4.3 Detekce reakce robotu do montážní plochy

Princip vyhodnocení kolize ze zatížení robotického zařízení přenášeného do podlahy využívá firma FANUC. Montážní poloha je u této firmy omezena pouze na robot přimontovaný k podlaze. Mezi robotem a montážní deskou je umístěn senzorický systém (černý objekt viz Obr. 24) umožňující vyhodnocovat zvýšené zatížení přenášené do podlahy oproti předpokládanému zatížení vznikajícího od robotu a jeho pohybu. Princip zařízení není bohužel dohledatelný.



Obr. 24 Robot se senzorem zatížení přenášeného do podlahy[33]

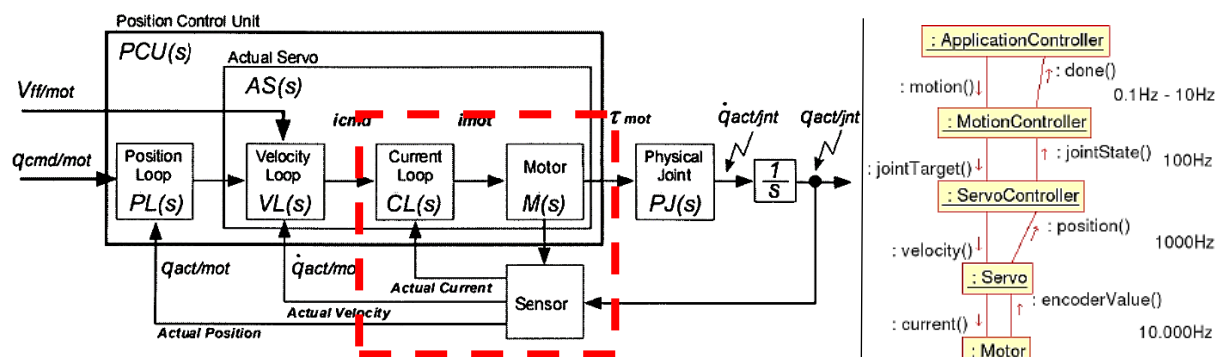
Nevýhodou řešení je, že senzor zaznamenává zatížení i v opačném směru. Pokud se tedy robot nachází v blízkosti zdroje vibrací nebo otřesů, vstupují do snímače rušivé vlivy. Plocha, kam je robot montován musí být broušená a rovná s vysokou přesností, protože naklopení robotu není žádoucí. Senzor má aktuálně vysokou hmotnost.

2.5 Způsoby detekce kolize spolupracujících robotů

Specializované roboty určené přímo pro použití na pracovištích pro spolupráci s člověkem jsou vybaveny vestavěnými snímači přímo v jejich kloubech (pohonech). Výrobci používají různé způsoby detekce kolize, informace o jejich fungování jsou většinou nedohledatelné. Některé principy jsou tedy odhadnuty z vědeckých prací, ze kterých roboty vycházejí, z dostupných patentů nebo z informací od výrobců/prodejců zařízení.

2.5.1 Měření zatížení motoru

Nejčastěji používanou metodou je vyhodnocování zatížení pohonu z hodnoty elektrického proudu protékajícího motorem. Proudová smyčka je nejvnitřnější smyčkou řídicího systému a musí mít co nejrychlejší odezvu.



Obr. 25 Diagram řízení pohonu v kloubu robotu[34] a komunikační schéma (vpravo)[35]

V řídicí jednotce dochází k porovnání aktuální hodnoty elektrického proudu s predikovanou hodnotou zátěžného momentu vypočítanou na základě žádaných kinematických veličin a dynamických vlastností, jako je hmotnost veškerých hmot na výstupu pohonné jednotky a jejich setrvačné účinky. Moment motoru je závislý na elektrickém proudu, který protéká vinutím. Na základě vypočítané předpokládané hodnoty je stanovena prahová hodnota. Pokud aktuální hodnota proudu překročí tuto prahovou hodnotu, systém vyhodnotí tento stav jako kolizní. Aby byly výsledky co nejpřesnější, prahová hodnota by měla být co nejblíže k hodnotě predikované. Z tohoto důvodu musí být systém řádně kalibrován a v každém okamžiku nastavena aktuální hmotnost břemene manipulovaného robotem. Robot může ovlivnit například kabeláž vedená po těle robotu nebo mechanická porucha/úprava pohonné jednotky.

2.5.2 Měření absolutní polohy/natočení článku

V robotech v nižší cenové kategorii je použita kombinace měření přetížení pohonů na základě elektrického proudu a natočení kloubu. Řídicí jednotka má dva údaje o natočení pohonné jednotky. Inkrementální enkodér vrací hodnotu natočení hřídele motoru a měření natočení článku je realizováno absolutními enkodéry.

Snímač je umístěn na výstupu pohonné jednotky, hodnota natočení je tedy velice přesná a není ovlivněna pružností harmonické převodovky. Rozsah rotačních kloubů je omezen konstrukcí robotu, neomezená rotace je požadována většinou až na posledním kloubu. Klasický rozsah $\pm 170^\circ$ je možné měřit jedno otáčkovým absolutním enkodérem.

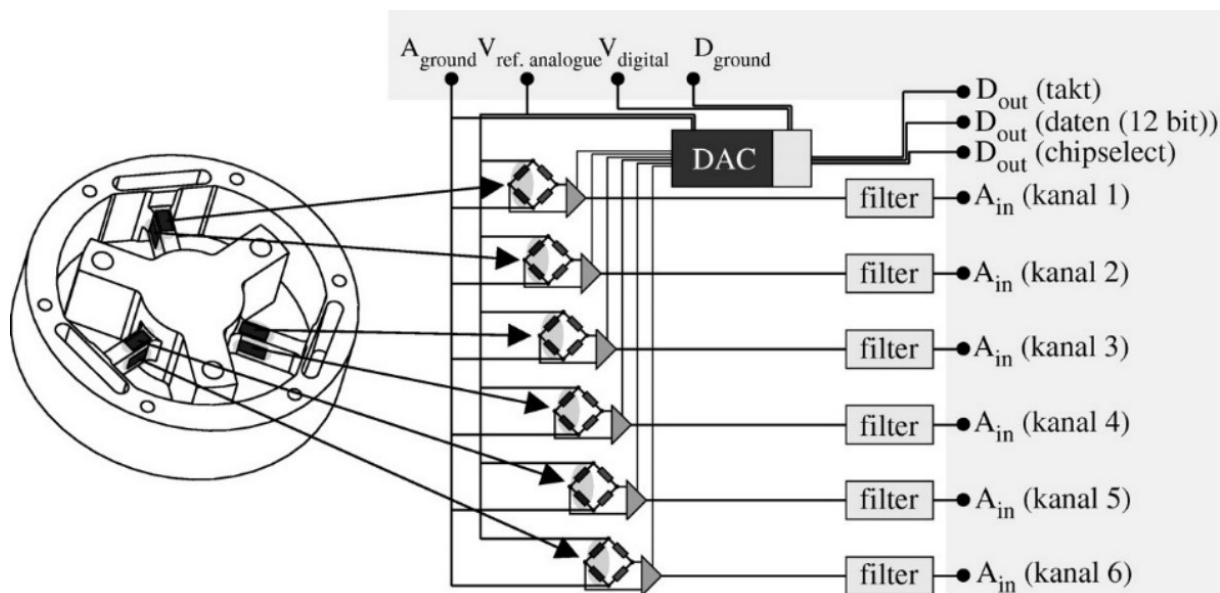


Obr. 26 Absolutní enkodéry – rotační (vlevo) a lineární (vpravo)[36]

V rotačních kloubech mohou být použity prstencové enkodéry z důvodu vedení kabeláže skrz pohonnou jednotku

2.5.3 Měření momentu tenzometry

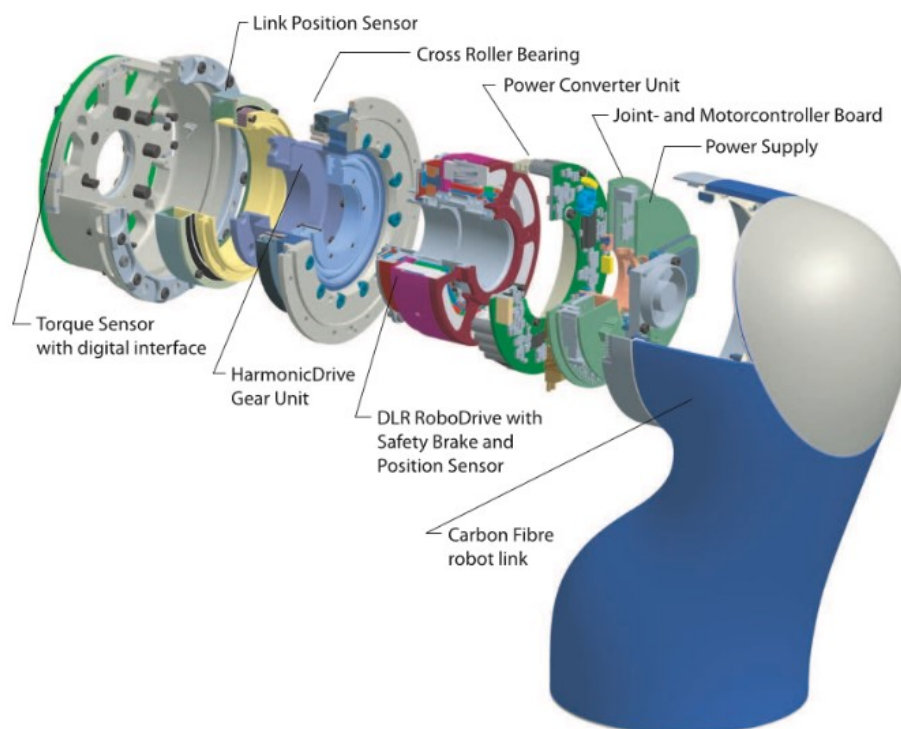
Nejpřesnější a nejcitlivější metodou měření přetížení v kloubech, tedy kolizní stav, je použití senzorů na principu zjišťování deformace materiálu s tenzometrickými snímači. V kloubu robotu je zařazen deformační člen osazený tenzometry. Deformační člen má zeslabená místa, kde se díl při zatížení definovaně deformuje. V těchto místech je velikost deformace měřena a vyhodnocována.



Obr. 27 Deformační člen s tenzometry[37]

Výhodou tohoto řešení je, že snímač je umístěn na výstupu pohonu, tedy až za převodovku. Zatěžující moment tedy není zjišťován přes mechanický převod a hodnoty zatížení jsou tedy nejpřesnější. Nevýhodou tohoto řešení je vysoká cena, vyšší hmotnost rotačních hmot a nevýhody vycházející z technologie měření, tedy velice slabý analogový signál, který musí být zpracován co nejbližší k měřicímu elementu z důvodu rušení.

Na obrázku Obr. 28, je vyobrazena sestava kloubu s velice přesnou detekcí kolize kombinující momentový snímač s měřením polohy/natočení kloubu jak na straně motoru, tak i na výstupu za převodovkou, samozřejmě je i proudová smyčka motoru.

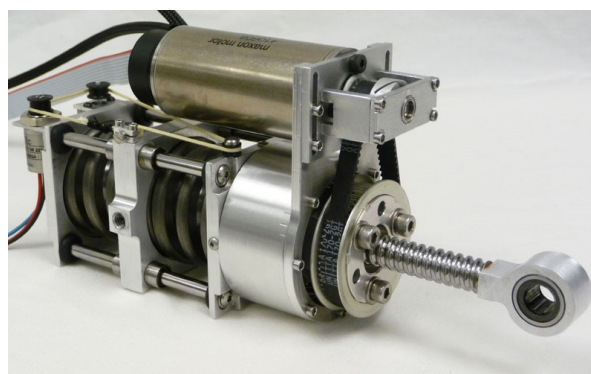


Obr. 28 Kloub robotu s momentovým senzorem[38]

2.5.4 SEA aktuátory

Jiným přístupem pro zajištění kontroly aplikované síly nebo momentu je použití elastického aktuátoru. Mezi pohonnou jednotku a zátěž je sériově vložen pružný člen, který eliminuje, ale také detekuje vzniklé špičky zatížení. Pružný člen disponuje zpětnou vazbou v podobě enkodéru, aby mohla být regulací dosáhnuta žádaná poloha a zjištěna síla.

Aktuátor je využit například u robotu Rethink Baxter pro pohon jeho kloubů. Robot tak dokáže detekovat kolizi, ale i působit definovanou silou bez použití tenzometrických snímačů aplikovaných na deformačních členech. Výhodou SEA aktuátorů je využití pružin, které mají téměř lineární charakteristiku závislosti síly na pružné deformaci. Problémem těchto aktuátorů může být právě vložený pružný člen, který snižuje tuhost mechanismu, tím i jeho přesnost.



Obr. 29 Schéma SEA aktuátoru (vlevo) a příklad aktuátoru(vpravo)[39]

Existuje mnoho způsobů zařazení pružného členu do pohonné jednotky. Příkladem může být aktuátor od texaské univerzity Obr. 29.

3 Cíle disertační práce

Cílem dizertační práce je definice metodických postupů návrhu pracovišť s kolaborativním robotem s přihlédnutím na aktuální dostupné technologie a následný návrh, realizace a vyhodnocení pilotního projektu.

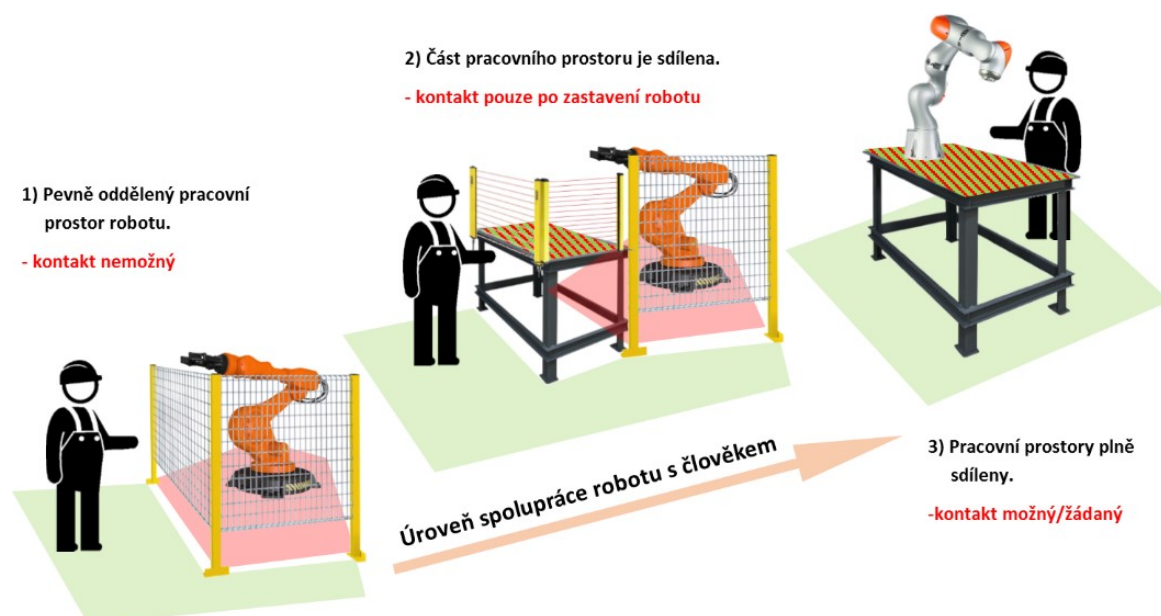
- Specifikace bezpečnostních požadavků na robotizovaná technologická pracoviště se spolupracujícími roboty – návrh bezpečnostního konceptu, posouzení rizik, ověření bezpečnosti
- Vytvoření metodiky výběru vhodných aplikací pro nasazení spolupracujících robotů, stanovení specifických podmínek pro nasazování
- Zhodnocení souvisejících faktorů – investic, režijních nákladů, nákladů na výrobní personál, návratnosti investic, procesní spolehlivost apod.
- Návrh a realizace pilotního projektu.
- Zmapování zkušeností, poznatků z pilotního projektu.

4 Bezpečnostní požadavky na robotizovaná pracoviště

4.1 Formy spolupráce robotu s člověkem

Definovány byly čtyři typy provozní spolupráce, které jsou popsány v bezpečnostním standardu ČSN EN ISO 10218-2, kapitola 5.10. Jedná se o Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety-rated Monitored Stop), Ruční vedení (Hand Guiding), Monitorování rychlosti a polohy (Speed and Separation Monitoring) a Omezení síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládáním (Power and Force Limiting). Pro některé typy aplikací je potřeba využít speciálních manipulačních ramen s vnitřní sensorikou. Další typy aplikací počítají s nasazením konvenčního robotu s pomocnou sensorikou a řízením.

S rostoucí úrovní spolupráce dochází k čím dál většímu prolínání pracovních prostorů člověka a robotu, až jsou nakonec úplně sjednoceny, viz Obr. 30. Při nulové spolupráci jsou prostory odděleny pevnou bariérou nebo virtuální ve formě skeneru nebo světelné závory (1). Vyšší formou spolupráce je sdílení prostoru ale s pohybem stroje pouze v nepřítomnosti člověka (2) až po simultánní pohyb člověka a robotu (3).

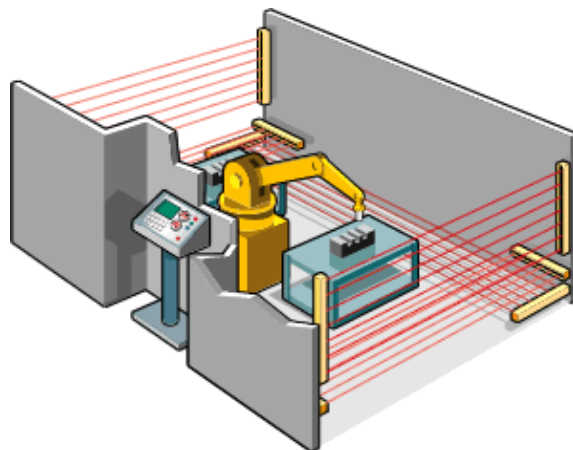


Obr. 30 Sdílení pracovních prostorů robotu a člověka

4.1.1 Bezpečnostní monitorované zastavení (Safety-rated Monitored Stop)

Jedná se o aplikace, kdy člověk s robotem sdílí část nebo celý pracovní prostor robotu. V případě přítomnosti člověka v tomto prostoru je robot zastaven a vyčká, dokud člověk prostor neopustí. Ve sdíleném prostoru tedy může pracovat buď robot, nebo člověk. Robot není vypnut bezpečnostním stopem, pouze zastaven, pohony zabrzděny a jeho poloha a natočení všech kloubů je během zastavení stále monitorována.

Tento způsob kooperace se používá například při manuálním vkládání objektů do koncového efektoru robotu nebo do přípravku, ze kterého si robot díl odebere. Dále například během operací s nutností vizuální kontrol nebo u dokončovacích operace a úkonů, které by byly nákladné zařadit do automatizované produkce. Dalším příkladem je osazování drobných dílů nebo robot může naopak člověku pomáhat při manipulaci s těžkými předměty.



Obr. 31 Monitorované pracoviště s bezpečnostními světelnými závory [40]

4.1.2 Ruční vedení (Hand Guiding)

Při ručním vedení robotu operátorem, manipulátor pouze kompenzuje zatížení, aby udržel polohu koncového bodu. Operátor může s manipulátorem pohybovat volně v prostoru bez toho, aby vynaložil velké síly. Dochází tedy k přímému kontaktu člověka s robotem, robot ale neinicuje žádný pohyb, pouze je přímo veden operátorem. Rychlost pohybu je kvůli bezpečnosti omezena a robot je také opatřen bezpečnostními prvky.

Pro navádění robotu musí být zařízení opatřeno měřicím prvkem, který snímá vstupní zatížení. Některé roboty mají citlivé měřicí prvky – snímače krouticího momentu – přímo v kloubech. Standardní robot může být pro tento typ spolupráce použit také. Na zápěstí musí mít senzor, který je schopen změřit vstupní silové a momentové zatížení. Tyto informace jsou potom zpracovány řídicí jednotkou a je řízena poddajnost robotu.

Bezpečnost je klíčová z důvodu přímého kontaktu člověka s robotem. Při přítomnosti člověka v pracovním prostoru robotu je robot zastaven a čeká na pokyny operátora. Robot musí být opatřen dostupným bezpečnostním stopem. Pro zvýšení bezpečnosti bývá v místě uchopení robotu pro jeho navádění povolovací tlačítko (tlačítko mrtvého muže). S robotem lze pohybovat pouze, pokud je tlačítko stlačeno.

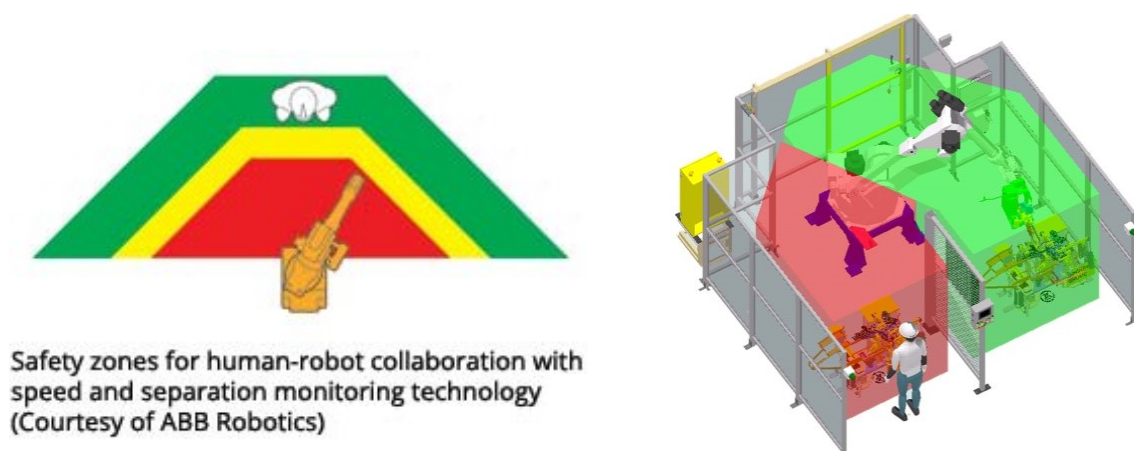


Obr. 32 Navádění robotu[41]

4.1.3 Monitorování rychlosti a polohy (Speed and Separation monitoring)

Pracovní prostor robotického pracoviště je rozdělen do několika oblastí. Tyto oblasti jsou monitorovány skenery nebo kamerovým systémem. V oblastech, kam robot nedosáhne a nemůže člověka ohrozit, ale je zde například riziko úrazu způsobeného upuštěním předmětu manipulace, je robot zpomalen na bezpečnou rychlost. Při narušení prostoru v dosahu robotu, je robot úplně zastaven. Pokud se člověk nenachází ani v jedné z oblastí, robot může jet maximální rychlostí.

Detekovaných oblastí může být více a pro každou je nastavena specifická rychlost a zrychlení. Oblasti mohou mít různé tvary a velikosti podle použitých snímacích zařízení. Zónové monitorování je použito, pokud člověk vchází do pracovního prostoru robotu. Vhodná aplikace je například pracoviště, kdy robot jede při maximálních parametrech, ale člověk musí v určitém intervalu do prostoru vstoupit. Například v rámci logistiky přivádí nebo odebírá palety. Jinou možností je práce člověka a robotu ve společném prostoru, pracují ale každý ve své zóně.



Obr. 33 Zónové monitorování[42][43]

4.1.4 Omezení síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládáním (Power and Force Limiting)

Pro tento typ kooperace jsou potřeba speciální roboty. Roboty mají sledovány parametry pohybu s vysokou přesností a dokážou detekovat i drobná vychýlení oproti naprogramovaným pozicím. Pro sledování rychlosti a polohy jsou použity přesné enkodéry s vysokým rozlišením. Síly a krouticí momenty jsou měřeny a vyhodnocovány pomocí momentových senzorů v kloubech robotu, tenzometricky nebo podle proudu odebíraného motorem pohonu kloubu. Robot tedy dokáže identifikovat náraz do překážky, v extrémně krátkém čase jej vyhodnotit a zareagovat. Robot při nárazu může zabrzdit své pohony a okamžitě zastavit, případně vykonat protipohyb v opačném směru, aby co nejvíce snížil energii, která by byla předána nárazem.

Maximální možná síla nárazu byla uváděna 150 N ve starších verzích normy ČSN EN ISO 10218-2, konkrétní hodnoty pro různé části těla jsou uvedeny v technické specifikaci ISO/TS 15066. Rychlost pohybu robotu ve spolupracujícím režimu byla stejně jako síla ve starší verzi robotické normy omezena na 250 mm za sekundu. Nyní lze podle výpočtu v technické specifikaci rychlost nastavit výrazně vyšší. Pro prvotní návrh hodnot je v technické specifikaci graf závislosti rychlosti na hmotnosti pohybujících se hmot pro různé oblasti lidského těla, kde může dojít ke kontaktu.

Tyto roboty mají odlehčenou konstrukci, aby robot pohyboval s co nejmenšími hmotami a energie nárazu byla co nejmenší. Tvary manipulátoru jsou vysoce optimalizovány a odlehčeny. Kvůli složitosti tvaru a tenkých stěn jsou díly vyráběny technologiemi přesného lití.



Obr. 34 Roboty s funkcí omezení výkonu a síly - ABB YuMi[44], KUKA LBR iiwa[45], UR5[46]

4.2 Analýza rizik

Bezpečnost je nejdůležitější vlastností každého zařízení. Problematika zajištění bezpečnosti a analýzy možných rizik však není vůbec jednoduchá. Kompletními postupy návrhu bezpečného stroje nebo pracoviště se zabývá řada technických norem. Bezpečnost zařízení je dána několika oblastmi, jako bezpečnost elektrických zařízení nebo bezpečnost použitých technologií. Tato práce se zabývá bezpečností mechanickou, kterou je potřeba řešit vždy, když je na pracovišti část, která vykonává mechanický pohyb. Pokud vykonává některý z elementů pracoviště pohyb, může dojít ke kolizi, což nese rizika. Při návrhu a realizaci zařízení je důležité veškerá možná rizika znát a pokud možno je eliminovat. K tomu slouží analýza rizik, která se skládá ze dvou částí, posouzení rizik a snížení rizik. Analýza rizik je vyžadována přímo evropskou směrnicí č. 2006/42/EC u každého nového i pozměněného zařízení.

Téma spolupráce robotu s člověkem je spojeno s využíváním speciálních robotů nebo jejich periferních zařízení umožňujících detekci nebo také predikci kolize. S tím je spojeno omezení nebo úplná eliminace bezpečnostního hrazení a zón se zamezeným přístupem. Bezpečnost je tedy řízena na jiné úrovni, a to s možností kontaktu osoby s pohybujícím se zařízením.

Pracoviště se spolupracujícím robotem jsou specifická a mohou mít odlišné požadavky než konvenční zařízení. Firmy zabývající se tímto tématem představují postupy, kterými by se dalo řídit a vznikají také nové standardy. Obecná metodika zatím neexistuje.

4.2.1 Riziko, nebezpečí, zdroj nebezpečí

Pojem riziko je spojen s pravděpodobností nebo možností vzniku úrazu nebo škody, je to předpokládaná hodnota škody. Riziko se dá formulovat jako výsledek projevu určitého nebezpečí, který vyústí v určitý negativní následek, úraz, škodu[47].

Riziko

- je kvantitativní a kvalitativní vyjádření ohrožení (míra ohrožení, stupeň ohrožení)
- vyjádření pravděpodobnosti, že vznikne negativní jev a zároveň i důsledky tohoto jevu
- vyjadřuje, kolikrát se negativní jev vyskytne a co způsobí
- definuje se jako kombinace pravděpodobnosti nežádoucí události a rozsahu, závažnosti možného zranění, škody nebo poškození zdraví.

Nebezpečí

- stroje, materiály, technologie a pracovní činnosti se vyznačují tím, že mohou způsobit neočekávaný negativní důsledek - např. poškození majetku nebo zranění člověka. Jde o nebezpečí nebo nebezpečné činnosti
- je to podstatná, ale skrytá vlastnost nebo schopnost něčeho (materiálu, stroje, pracovní činnosti), která může zapříčinit vznik škody
- je to zdroj možného ohrožení nebo škody.

Zdroj nebezpečí

- stroje, materiály, technologie a pracovní činnosti, které mají aktivní vlastnost způsobit negativní jev, úraz nebo škodu
- zdroj nebezpečí je schopen aktivovat nebezpečí v konkrétním prostoru a času

Uvedené tři pojmy spolu velice úzce souvisejí. Nebezpečí je zdrojem ohrožení a riziko můžeme chápat jako míru tohoto ohrožení. Máme-li tedy rizika řídit, omezovat, je nezbytné znát zdroje nebezpečí, charakter nebezpečí i pravděpodobné následky. K tomu slouží analýza a celkové posouzení rizik.



Obr. 35 Symbol výstrahy před rizikem a nebezpečím

4.2.2 Rozdělení bezpečnostních norem

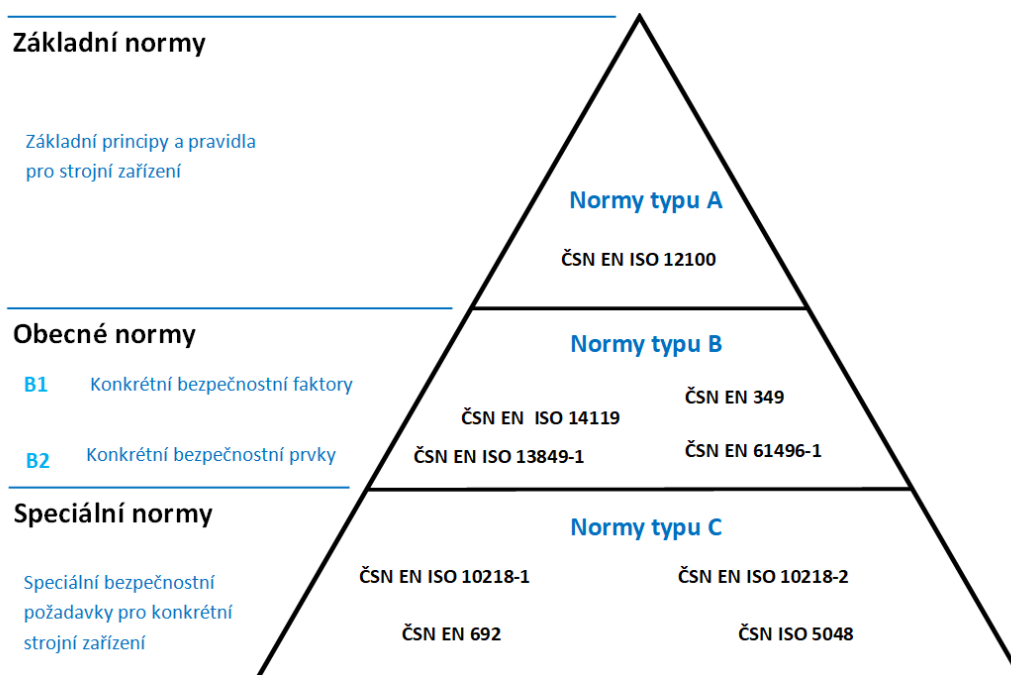
Bezpečnostní normy jsou hierarchicky rozděleny do několika úrovní. Normy na nejvyšší úrovni předepisují obecné požadavky na strojní zařízení, další úrovně udávají požadavky v konkrétních skupinách a jednotlivých případech.

Normy typu A

Normy typu A jsou základní bezpečnostní normy. Nejdůležitější normou, na základě které jsou dále vytvářeny normy ostatní je harmonizovaná norma **ČSN EN ISO 12100 - Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika**. Tato norma přináší konstruktérovi souhrnný systém pravidel a návodů, které mu umožní navrhnout a vytvořit stroje, které jsou bezpečné, pokud jsou používány podle návodu k použití. Obecně normy typu A uvádějí základní pojmy, zásady pro projektování a konstrukci, a také obecná hlediska, která mohou být použita pro veškerá strojní zařízení.

Mezi normy typu A dále patřila například harmonizovaná norma **ČSN EN ISO 14121 Bezpečnost strojních zařízení - Posouzení rizika**, ta je již zahrnuta v normě uvedené výše.

Mezinárodním standardem na této úrovni je **IEC 61508 - Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems**. Je základní normou pro funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických systémů spojených s bezpečností.



Obr. 36 Základní rozdělení norem

Normy typu B

Normy typu B jsou obecné bezpečnostní normy. Tyto normy se zabývají konkrétním bezpečnostním aspektem nebo jedním bezpečnostním zařízením, které je využitelné v širším rozsahu strojních zařízení. Normy typu B jsou ještě rozděleny na podskupiny B1 a B2. Normy typu B1 specifikují požadavky a řeší konkrétní bezpečnostní faktory. Mezi tyto faktory mohou patřit bezpečné vzdálenosti, teplota povrchu, hluk, elektrická bezpečnost stroje, požadavky na řídicí systémy a podobně. Normy typu B2 řeší konkrétní bezpečnostní prvky jako blokovací zařízení, kryty, obouruční ovládací zařízení nebo zařízení citlivá na tlak.

Mezi normy typu B patří například harmonizovaná norma **ČSN EN ISO 13849 - 1 Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Obecné zásady pro konstrukci**. Tato norma obsahuje důležitou kapitolu pro analýzu rizik. V Příloze A – Určení požadované úrovně vlastností (PLr) je postup vyhodnocení požadovaných úrovní vlastností jednotlivých funkcí. Spolu s popisem funkcí je to zásadní informace pro konstruktéra pro vyhodnocování rizik.

Dalšími důležitými normami v této kategorii jsou například **ČSN EN 349- Bezpečnost strojních zařízení – Nejmenší mezery k zamezení stlačení částí lidského těla** nebo **ČSN EN ISO 14119 - Bezpečnost strojních zařízení – Blokovací zařízení spojená s ochrannými kryty - Zásady pro konstrukci a volbu**, dále **ČSN EN 61496-1 - Bezpečnost strojních zařízení - Elektrická snímací ochranná zařízení - Část 1: Obecné požadavky a zkoušky**, která například pojednává o bezpečnostních optoelektronických závorech.

Normy typu C

Normy typu C jsou speciální bezpečnostní normy pro stroje. Normy obsahují podrobné bezpečnostní požadavky na konkrétní stroj nebo skupinu strojů. Své normy mívají většinou zařízení určené do náročných podmínek, jako je výbušné prostředí, prostředí s radiací nebo také velmi čistá a hygienická prostředí. Normy mají také speciální nebo atypické konstrukce zařízení. Pokud pro zařízení existuje norma typu C, je nadřazená normám typu B a A.

Patří sem například norma **ČSN EN ISO 10218 - Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů**, která je zásadní z pohledu robotiky.

Z popisu výše vyplývá, že normy se zvyšujícím se abecedním pořadím jsou detailnější a konkrétnější vzhledem k určitému zařízení. Výsledné zařízení musí splňovat jak specifické požadavky dané normou typu C, tak i požadavky skupinové vycházející z normy typu B a současně nesmí být v rozporu s požadavky, které udává základní norma typu A.

4.2.3 Posouzení rizik

Posouzení rizik je sled logických úkonů, které musí podle směrnice pro strojní zařízení provést každý, kdo vytváří nový stroj nebo upravuje stroj existující. Tento proces umožňuje systematickou analýzu a identifikaci rizik, dále vyhodnocení jejich důležitosti a porovnání se standardy, určení přípustné hranice rizika a následnou eliminaci případně popis reziduálních rizik. Požadavky pro posouzení rizik stroje definuje harmonizovaná norma ČSN EN ISO 12100, která je kombinací norem ČSN EN ISO 14121-1 a ČSN EN ISO 12100-1/-2.

Posouzení rizik probíhá v několika krocích, které budou detailně popsány. Proces začíná již při návrhu konstrukce, v průběhu a na konci realizace však musí být vyhodnocena nejen rizika vycházející z konstrukce, ale také rizika vycházející ze všech pracovních operací stroje.

Určení rozsahu

Celý proces posouzení rizik začíná stanovením funkcí zařízení a analýzou prostředí ve kterém se stroj bude nacházet. Tyto informace vycházejí ze zadání a je potřeba definovat základní body jako například:

- Stanovení základních funkcí stroje (co vyrábí, použité technologie, maximální výkon)
- Prostorové požadavky (místo instalace, přístup obsluhy, dostupnost energií, prostředí)
- Provozní etapy stroje (požadavky na instalaci, provoz, servis a likvidaci, životnost)
- Provozní režimy stroje (plnění různých funkcí, výrobní režimy)
- Provozní personál (role pro různé etapy stroje a jejich pravomoci)
- Vstupní a výstupní materiál a odpadní produkty
- Procesy běžného používání zařízení, procesy neúmyslné nebo nesouvisející s řádným provozem
- Očekávané poruchy, selhání, opotřebení

Tyto body jsou potenciálními zdroji rizik, je tedy zásadní je definovat v největším možném rozsahu a průběžně kontrolovat, jestli je stroj navrhován, konstruován a provozován v jejich souladu. Pro robotická zařízení je navíc důležitá definice průmyslového robotu:

- Robot (Maximální: dosahy, rychlosti a zrychlení, nosnost; Bezpečnostní funkce)

Identifikace rizik

Další fází je systematická identifikace možných předvídatelných rizik, rizikových situací a rizikových událostí, které mohou vzniknout po dobu životnosti stroje:

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| • Mechanické ohrožení | • Ohrožení v důsledku hluku |
| • Ohrožení el. proudem | • Ohrožení vibracemi/kmitáním |
| • Tepelné ohrožení | • Ohrožení zářením |

- Ohrožení od nebezpečných látek
- Ohrožení od ostrých hran, hrotů
- Ohrožení ze zanedbání ergonomie
- Ohrožení od pádu, uklouznutí
- Ohrožení od okolní zástavby
- Kombinace rizikových faktorů

Mnohá rizika mohou být identifikována na základě příkladů v normách nebo zkušeností z minulých projektů. Množství rizik však vychází z aktuální konstrukce a podmínek.

Odhad rizika

Rizika pro některá konkrétní zařízení lze vyhodnotit pomocí příslušných norem typu C. Pokud však taková norma neexistuje, odhad rizika může být vyhotoven podle základní A-normy nebo například pro odhad rizik řídicích systémů existují normy typu B - ČSN EN ISO 13849-1 a ČSN EN ISO 62061. Tyto normy definují základní požadavky na provedení a zajištění bezpečnostních funkcí. I když normy zohledňují stejné vstupní faktory a výstupní hodnota je přepočitatelná, nesmí být kombinovány nebo použity zároveň. Konstruktor si musí vybrat vhodnější normu pro dané zadání. Druhá z jmenovaných norem je navržena výhradně pro elektrická a elektronická zařízení a výstupem je hodnota SIL (Safety integrity level). Norma ČSN EN ISO 13849-1 má výstupem hodnotu PLr (Performance level) a zahrnuje rizika spojená s mechanikou, hydraulikou a pneumatikou. U komplexních robotických zařízení je tedy využita tato norma.

Tab. 1 Porovnání výstupů norem pro odhad rizika (vlevo ČSN EN ISO 13849-1, vpravo ČSN EN ISO 62061) [48]

PL - Úroveň vlastností	Průměrná pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu [1/h]	SIL	Pravděpodobnost výskytu poruchy za hodinu provozu
a	≥ 10 až $< 10^{-4}$		
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ až $< 10^{-5}$	1	10^{-6} až $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ až $< 3 \times 10^{-6}$	2	10^{-7} až $< 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ až $< 10^{-6}$	3	10^{-8} až $< 10^{-7}$
e	$\geq 10^{-8}$ až $< 10^{-7}$		

Všechny normy posuzují tyto základní faktory rizika:

- Závažnost možného zranění/poškození zdraví
- Pravděpodobnost případně četnost a doba trvání rizikové situace
- Technické a lidské možnosti vyvarovat se rizikové situaci

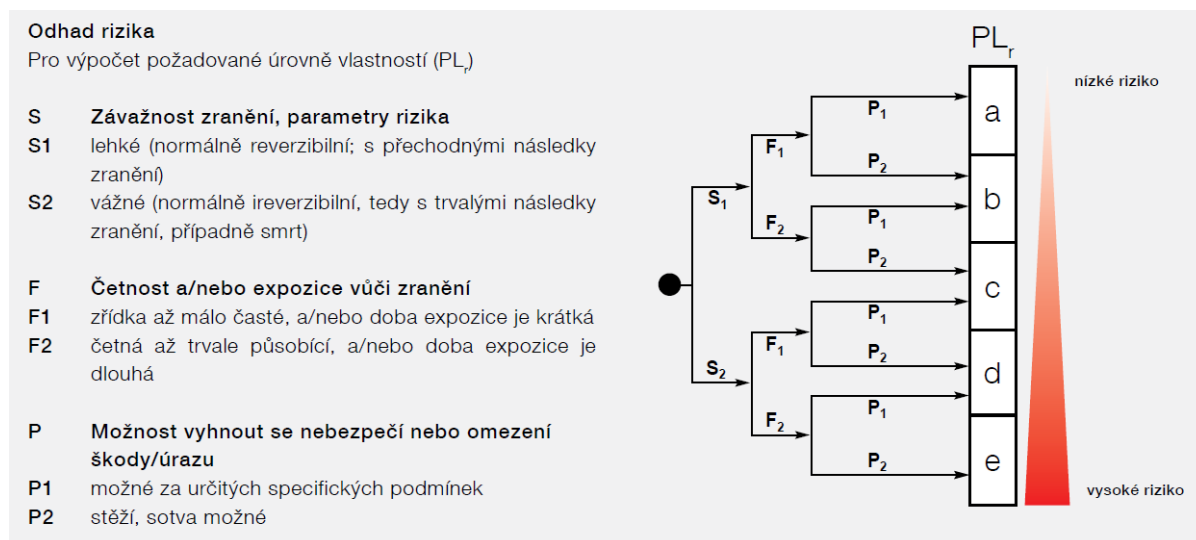
Závažnost zranění je rozdělena na úroveň lehkých zranění jako odřeniny, zhmožděniny, bodná a řezná zranění, a těžkých zranění jako je poranění kostí, amputace a zranění s následkem smrti. Je také potřeba posoudit rozsah úrazu, jestli jde o jednotlivce nebo více osob.

Pravděpodobnost vzniku rizikové situace ovlivňuje potřeba přístupu do nebezpečného prostoru, jeho délka, četnost a povaha. Dále počet osob, které se v daný moment v prostoru nachází. Tento údaj může být opět rozdělen na úrovně: málo častá expozice riziku nebo krátká a častá případně dlouhá. Rozhodováno může být na základě statistických historických dat, spolehlivosti částí zařízení nebo historie úrazů spojených s daným rizikem.

Při hodnocení možnosti vyvarování se riziku je vycházeno z lidské schopnosti vyvarovat se úrazu (reflexivní chování, možnost úniku, hbitost), kvalifikace a oprávněnosti různých osob vystavujících se riziku, uvědomění si rizika nebo praktických zkušeností. V úvahu musí být brána také rychlost se kterou může vzniknout nebezpečná situace vedoucí k úrazu.

Do odhadu rizika musí být zahrnuta také důležitá hlediska jako je přístup nejen v běžném provozu, ale například z důvodu údržby, hledání závad nebo čištění. V některých situacích může dojít k vyřazení nebo obcházení bezpečnostních ochranných funkcí. Důležité je vzít v úvahu lidský faktor: psychická hlediska (stres, únava, potřeba komunikace a spolupráce), fyzická vybavenost a omezení, ergonomie, ale také zkušenosti obsluhy zařízení.

Úroveň rizika může být stanovena z obrázku Obr. 37:



Obr. 37 Odhad rizika podle normy ČSN EN ISO 13849-1[49]

Odhad rizika může být také proveden jinými způsoby než dle normy ČSN EN ISO 13849-1. Příkladem může být kvantitativní způsob ohodnocení rizik. Rizika jsou číselně ohodnocena podle různých kritérií. Takový způsob například doporučuje firma Pilz, kde úroveň rizika je vypočtena podle vzorce:

$$\text{ÚROVEŇ RIZIKA} = ZZ * PV * MV * \text{ČE}$$

kde Závažnost zranění (ZZ) je ohodnocena:

- 0,25 škrábance, modřiny
- 0,5 pořezání, popáleniny v malém rozsahu, drobné zdravotní problémy
- 3 zlomenina malé kosti (články prstů)
- 5 zlomenina velké kosti (horní/dolní končetina)
- 8 amputace článků prstů, popáleniny ve větším rozsahu
- 11 amputace končetiny, částečná ztráta sluchu/zraku
- 15 amputace dvou končetin, totální ztráta sluchu/zraku
- 25 kritická zranění/onemocnění s trvalými následky
- 40 smrt člověka
- 65 smrt více lidí

Pravděpodobnost výskytu (PV) je hodnocena:

- 0.05 téměř vyloučená
- 1.25 nepravděpodobná
- 2.5 možná
- 4 pravděpodobná
- 6 zaručená

Možnost vyhnout se riziku (MV) má hodnoty:

- 0.75 možné
- 2.5 možné za určitých podmínek
- 5 nemožné

Četnost expozice (ČE) se může ohodnotit jako:

- 0,5 výjimečně
- 1 měsíčně
- 2 týdně
- 3 denně
- 4 každou hodinu
- 5 nepřetržitě

Po dosazení příslušných hodnot do vzorce vychází hodnota úrovně rizika, která je vyhodnocena v následující tabulce.

Tab. 2 Odhad rizika

Úroveň rizika		Riziko	Příznaky
	1-10	Zanedbatelné	Prakticky žádné nehrozí žádné nebezpečí úrazu nebo škody. Riziko nemusí být dále bráno v úvahu.
	11-20	Velmi nízké	Velmi nízké riziko vzniku úrazu nebo škody. Riziko nemusí být snižováno, ale mohou být doporučeny ochranné pomůcky nebo školení.
	21-45	Nízké	Existence možného rizika. To musí být zhodnoceno třístupňovou metodou snížení rizika.
	46-160	Střední	Existuje riziko, které musí být sníženo, protože představuje nebezpečí pro zdraví člověka. Rizika musí být snížena při první příležitosti.
	161-500	Vysoké	Potenciální nebezpečí, riziko musí být sníženo prioritně.
	501+	Velmi vysoké	Riziko musí být sníženo okamžitě nebo musí být přepracován návrh konstrukce.

Každá aplikace může mít jiná specifika, která je nutno zařadit do ohodnocení rizik. Kromě uvedeného příkladu z normy a kvantitativního způsobu od firmy Pilz existují další postupy, kterými se může člověk inspirovat, případně si vytvořit vlastní podobný.

4.2.4 Hodnocení rizik

Pokud jsou rizika identifikována a ohodnocena příslušnou úrovní je potřeba vyhodnotit, jak s nimi nakládat dále. U rizika může být vyhodnoceno, že nepředstavuje nebezpečí nebo že byla aplikována dostatečná ochranná opatření a bylo sníženo na přijatelnou úroveň. Druhou možností je vyhodnocení rizika jako nevyhovující a musí být provedeno jeho snížení. Proces analýzy rizik je cyklický a dalším krokem může být jeho ukončení nebo provedení opatření ke snížení rizik.

Snížení rizik

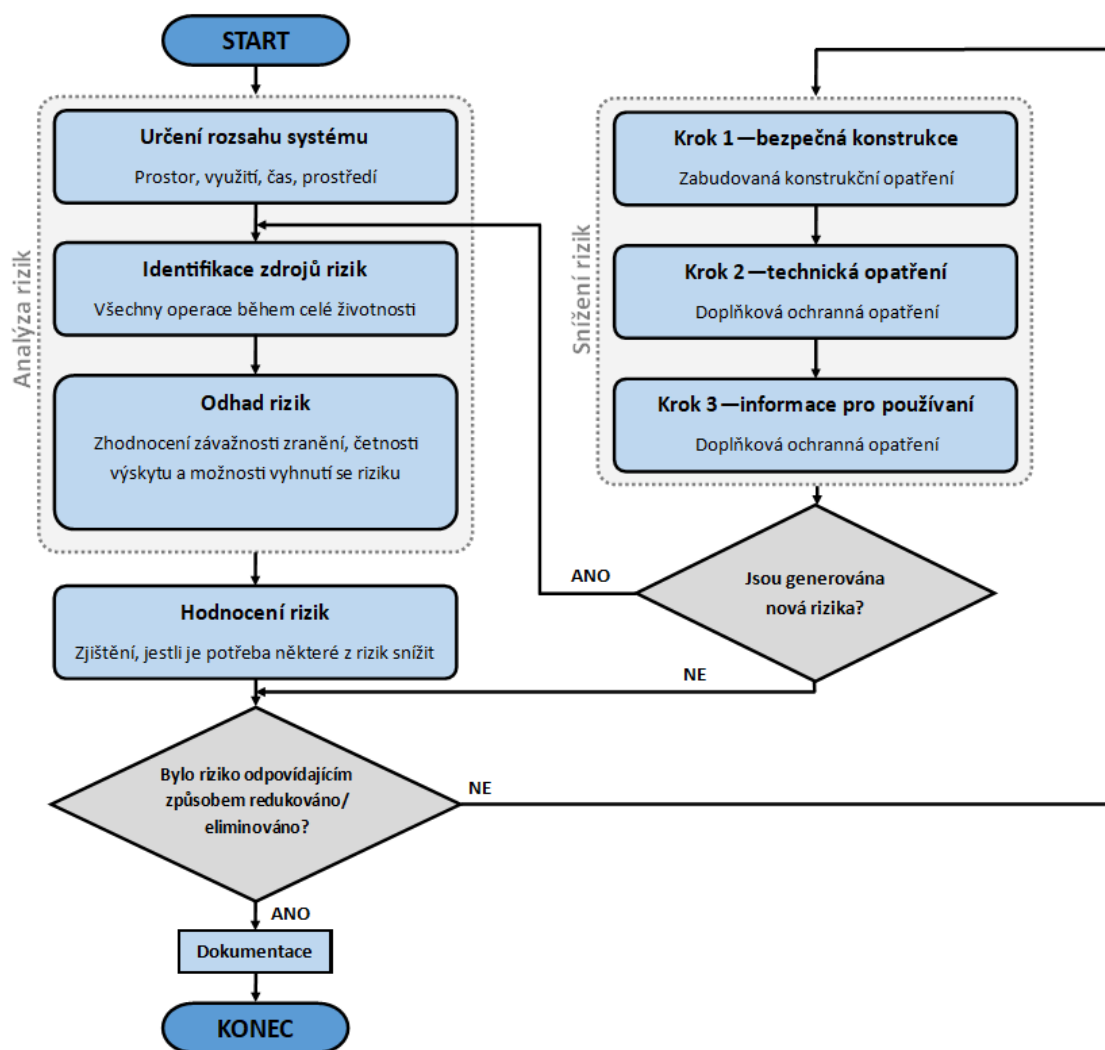
Pokud je riziko vyhodnoceno jako nepřijatelné, tedy pokud je střední, vysoké a velmi vysoké, musí být zahájena opatření k jeho snížení nebo eliminaci. To je prováděno třístupňovou metodou. Výrobce je povinen provádět následující kroky v jejich stanoveném pořadí.

- Bezpečný návrh konstrukce – eliminace nebo minimalizace rizik již v etapě konstrukčního návrhu (například snížení výkonu, zabránění průniku do nebezpečné zóny, použití měkkých materiálů, eliminace ostrých hran a hrotů) a integrace bezpečnostních opatření do konstrukce stroje.
- Technická opatření – použití ochranných a bezpečnostních zařízení (oplocení, optoelektronické snímače, potvrzovací zařízení, kontrolní zařízení)
- Informace pro uživatele o zbytkovém riziku

Nejdůležitějším a prvním stupněm procesu eliminace/minimalizace rizik je rozvaha již při návrhu konstrukce. Účinnost opatření je prokazatelně nejvyšší a ekonomicky nejefektivnější. Pokud jsou požadavky na bezpečnost zohledněny ještě v projekční etapě dojde k výraznému snížení nákladů na pozdější optimalizace a konstrukční úpravy. Mezi základními prvky úpravy může být samotná mechanická konstrukce zařízení, elektrické vybavení, koncept obsluhy a údržby, vyjímání konceptu zařízení a zásady pro odstavení stroje. Použité materiály, materiálový tok, pohonné hmoty a provozní tekutiny. V neposlední řadě použité technologie a výrobní proces stroje. Bezpečnost je vždy prioritní před funkcí stroje, v úvahu je ale také potřeba brát omezení vzniku škod na stroji a v jeho okolí.

Pokud některá rizika nejde eliminovat úpravou konstrukce, je potřeba zařízení rozšířit o technická opatření, která zajistí bezpečnost. Tato opatření jsou realizována ochrannými prostředky jako jsou ploty, kryty nebo dveře pro fyzické zamezení přístupu do nebezpečného prostoru. Dále to mohou být světelné závory, scannery nebo kamerové systémy pro podmíněné zamezení přístupu do pracovního prostoru stroje. Kromě kontroly přítomnosti obsluhy v nebezpečném prostoru mohou být monitorovány i vlastnosti samotného systému (kontrola pozice, rychlosti, přítomnosti)

Posledním krokem pro snížení rizik je poskytnutí informací k používání. Zbytková rizika jsou důkladně popsána v dokumentaci a zařízení je opatřeno výstražnými značkami, signály nebo zařízeními. Uživateli stroje jsou vytvořeny bezpečné pracovní postupy, obsluhující personál je zaškolen a vybaven ochrannými pomůckami a je zřízen dozor a naplánována pravidelná revize.



Obr. 38 Diagram procesu posouzení rizik

Po snížení rizik ve třech krocích musí být ověřeno, zda nevznikla rizika nová. V takovém případě musí být znovu identifikována.

Ukončení analýzy

Pokud jsou všechna rizika snížena na přijatelnou úroveň, může být vytvořena dokumentace, které je protokol z analýzy rizik vždy součástí a posouzení rizik může být ukončeno. Posouzením rizik musí být dosaženo odpovídajícího snížení rizik:

- Byly-li vzaty v úvahu všechny etapy životnosti stroje a veškeré provozní režimy
- Byla-li předvídatelná rizika snížena na nejnížší možnou úroveň a vyloučena nebezpečí
- Byla-li ošetřena nová rizika vzniklá v procesu snižování rizik
- Jsou-li uživatelé dostatečně informováni o zbytkových rizicích
- Jsou-li ochranná opatření mezi sebou kompatibilní

Součástí tohoto procesu může být porovnání s dříve řešenými projekty nebo zařízeními, která jsou navrhovanému zařízení podobná.

4.2.5 Analýza rizik pracovišť se spolupracujícím robotem

Pracoviště s možností spolupráce robotu s člověkem jsou specifická důležitým faktorem, že člověk může přijít do kontaktu s pohyblivým se zařízením. U běžných zařízení jsou rizika odstraněna krytovaním nebo zabráněním vstupu. U spolupráce robotu s člověkem se však musí počítat s možným kontaktem a zde nastává mnoho otázek ohledně situací které mohou nastat. Zařízení tedy nemůže být hodnoceno pouze ve statickém nebo předprogramovaném opakujícím se stavu. Pracoviště je nutné ověřit z hlediska procesních stavů do kterých zasahuje obsluha. V normě ČSN EN ISO 10218 jsou popsány 4 způsoby možné spolupráce robotu s člověkem. Pro spolupráci robotu s člověkem jsou důležitá následující specifika:

Bezpečnostní monitorované zastavení

Jde o bezpečné zastavení a sledování polohy robotu při vstupu obsluhy do pracovního prostoru robotu. V tomto případě závisí riziko možnosti kontaktu obsluhy a stroje na bezpečnostních zařízeních, které pracovní prostor monitorují. Podle normy musí být všechny bezpečnostní funkce v kategorii PLd a výše.

Ruční vedení

Při ručním vedení není pohyb iniciován strojem, ale obsluhou. Opět musí být sledována poloha robotu a pomocí bezpečnostních funkcí vyhodnocováno, jestli nehrozí riziko například pádu manipulátoru z důvodu přetížení nebo jestli je robot v povoleném prostoru

Monitorování rychlosti a polohy

Robot se pohybuje s různými parametry, pokud je obsluha mimo jeho pracovní prostor, v bezpečnostní zóně a pracovním prostoru. Opět jako u prvního způsobu je bezpečnost závislá na bezpečnostních senzorech.

Omezení výkonu a síly

Zde je pravděpodobnost kontaktu obsluhy s pohyblivým se zařízením velice vysoká. Bezpečnost je závislá na bezpečnostních funkcích samotného robotu, který dokáže identifikovat kolizi a příslušně na ni zareagovat.

Základní normu o robotizovaných pracovištích zmíněnou na začátku kapitoly rozšiřuje technická specifikace ISO/TS 15066. Ta definuje další pojmy důležité pro posuzování rizik pracovišť se spolupracujícím robotem.

Dráha, kterou robot urazí před zastavením

Je to důležitý parametr, který udává vzdálenost, kterou robot urazí po příkazu zastavení do dobrzdění. Norma nese návod na výpočet tohoto parametru na základě rychlostí robotu, obsluhy a vzdálenosti, která je odděluje. V normě je uveden i výpočet času do zastavení robotu.

Rychlostní podmínky

Norma definuje situace, kde robot může jet plnou rychlostí a situace, kde musí být rychlost snížena. Jsou definovány povolené rychlosti a podmínky pro úplné zastavení.

Síla/Tlak

I když by nemělo dojít k neočekávané kolizi robotu s obsluhou. Jsou v TS definovány přípustné limity sil, kterými může v čas kolize působit na různá místa na těle člověka. Přes kolizní plochu jsou přepočteny i dovolené tlaky. Data jsou získána ze studia prahů bolesti, které je člověk schopen snést bez dalších následků.

Přípustné silové působení/tlak je definován pro dva typy kolizí, které jsou také definovány v technické specifikaci:

Kvazistatický kontakt

Jde o situaci, kdy je člověk nebo část jeho těla přimáčknuta proti pevné překážce a nemůže být uvolněna bez odjetí robotu. Při tomto kontaktu je překročen práh bolesti při mnohem menších silách.

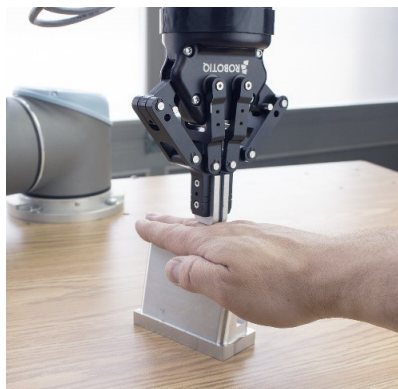
Pomíjivý kontakt

Někdy nazývaný dynamický náraz je kontakt, kdy robot do člověka narazí ve volném prostoru a nedojde k přimáčknutí, ale k odhození. Doba nárazu je krátká a lidské tělo snese větší síly. Tento typ kontaktu je závislý na pozici těžiště robotu a člověka a jejich vzájemné relativní rychlosti.


Výše zmíněné faktory musí být zohledněny při vytváření analýzy rizik pro pracoviště se spolupracujícím robotem.

4.2.6 Příklad provádění analýzy rizika

Firma Robotiq dodávající na trh bezpečné efektory a silové senzory provádí i osvětu a připravila výukové a informační materiály. Jeden z materiálů [50] ukazuje příklad rizikové analýzy pracoviště se spolupracujícím robotem. Níže je uvedena část analýzy přeložená z anglického originálu, hodnotící možné situace se zanedbatelným rizikem, které není potřeba dál řešit a nepřípustným rizikem, které si vyžaduje nápravná opatření.

Identifikace nebezpečné situace			Situace č.	1
Název	Detekce součásti			
Cíl	Ruka			
Provoz	Standardní provoz			
Operace	Hledání součásti Uchopování součásti			
Typ nebezpečí	Drcení a náraz (Quasi-statický kontakt)			
Popis	Robot UR5 hledá součást oběma čelistmi efektoru sevřenými k sobě a zastaví se při překročení silového limitu v dané výšce. Robot spustí program jen pokud detekuje součást. Síla je detekována silovým senzorem Robotiq FT300. Při této operaci je možné, že obsluha položí ruku na díl a ta se dostane mezi díl a efektor robotu. Robot se pohybuje redukovanou rychlostí 20 mm/s a silový limit pro detekci součásti je 10 N. Sevřené čelisti efektoru mají kontaktní plochu (13.5 x 23 mm) 310.5 mm2, což je 3,105 cm2.V případě nárazu silou 10 N vzniká na této ploše tlak(10 N/3.105 cm2) 3,22N/cm2. Tento tlak je ekvivalentní s energií nárazu 0.0001 J.Maximální dovolené hodnoty pro kolizi v oblasti ruky jsou 197 N/cm2 tlaku a 0.49 J energie. Náraz touto silou tedy splňuje dovolené limity uvedené v ISO/TS 15066.			
Odkazy:			ISO/TS 15066, ISO 10218	
Odhad a ohodnocení rizika				
Závažnost zranění:	0,5	Možnost vyhnutí se riziku:	0,75	
Pravděpodobnost výskytu:	1,25	Četnost a délka expozice:	4	
Pilz Hazard Rating (PHR):	1,875	Úroveň rizika:	Zanedbatelné riziko	
Snížení rizika				
Není potřeba				
Odhad a ohodnocení rizika				
Závažnost zranění:	n/a	Možnost vyhnutí se riziku:	n/a	
Pravděpodobnost výskytu:	n/a	Četnost a délka expozice:	n/a	
Pilz Hazard Rating (PHR):	n/a	Úroveň rizika:	Zanedbatelné riziko	

Obr. 39 Příklad analýzy rizik č.1

Identifikace nebezpečné situace		Situace č.	2
Název	Upuštění součásti		
Cíl	Ruka		
Provoz	Standardní provoz		
Operace	Manipulování součásti do pozice Mezioperační manipulace součásti		
Typ nebezpečí	Drcení a náraz (Quasi-statický kontakt)		
Popis	Robot při manipulaci s dílem musí položit díl na stůl. Při této operaci se robot pohybuje rychlostí 2000 mm/s a limitní síla je nastavena na 250 N. Plocha součásti, kterou dosedá na stůl je (89.2 mm x 38.25 mm) 34 119.2 mm2, což je 34.19 cm2. Vzniká zde tlakové zatížení 7.3 N/cm2. Výsledná hodnota tlaku není vysoká a nebude limitní v této operaci. Síla 250 N je ale o 30% vyšší než dovolený limit 193 N uvedený v ISO/TS 15066. Můžeme tedy předpokládat, že při aplikaci takovéto síly na ruku dojde ke zranění.		
Odkazy: ISO/TS 15066, ISO 10218			
Odhad a ohodnocení rizika			
Závažnost zranění:	3	Možnost vyhnutí se riziku:	2,5
Pravděpodobnost výskytu:	2,5	Četnost a délka expozice:	4
Pilz Hazard Rating (PHR):	75	Úroveň rizika:	Střední riziko
Snížení rizika			
Standardní limit 250 N je u robotu UR defaultní hodnota. Řešením je tedy omezit maximální nárazovou sílu na 150 N. Tato hodnota sníží závažnost možného zranění na hodnotu 0.5 (což sníží i celkové hodnocení) a sníží i celkové riziko na přijatelnou úroveň a pracoviště může pracovat v běžném provozu.			
Odhad a ohodnocení rizika			
Závažnost zranění:	0,5	Možnost vyhnutí se riziku:	2,5
Pravděpodobnost výskytu:	2,5	Četnost a délka expozice:	4
Pilz Hazard Rating (PHR):	12,5	Úroveň rizika:	Nízké riziko

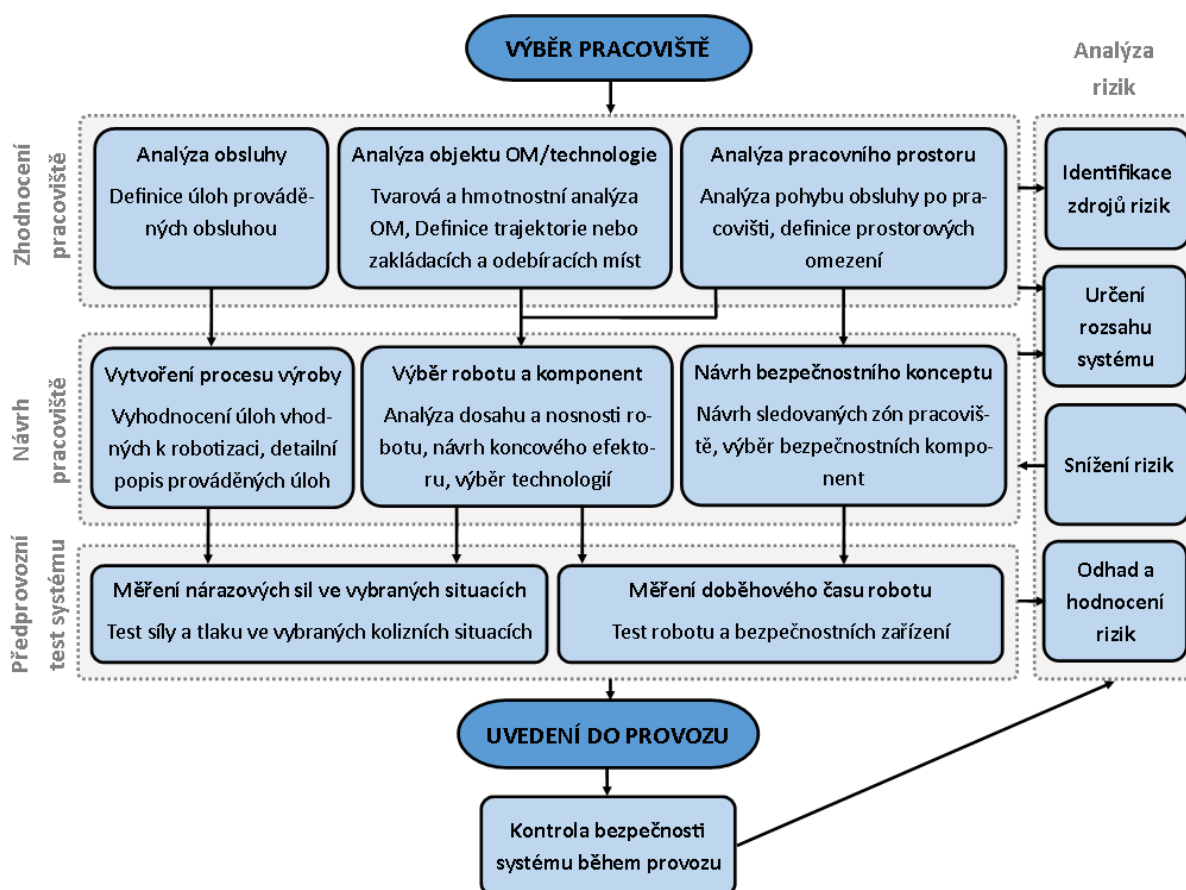
Obr. 40 Příklad analýzy rizik č.2

5 Metodika nasazování kolaborativních robotů

Roboty mohou spolupracovat s operátorem na pracovišti v různém rozsahu a formách uvedených v úvodní kapitole. Práce se zabývá nejvyšší formou spolupráce, tedy sdílení prostoru a operace ve stejném čase. Tato forma musí splňovat nejpřísnější podmínky. Při návrhu robotizovaných pracovišť s více omezenými formami spolupráce je možné také využít navrhovanou metodiku, některé parametry a kroky se budou lišit a mohou být navrženy dle standardních postupů navrhování robotizovaných pracovišť.

Navrhovaná metodika je členěna do celkem šesti etap. V průběhu celého návrhu je prováděna analýza rizik.

- Výběr pracoviště
- Zhodnocení navrhovaného pracoviště
- Návrh pracoviště a výběr komponent
- Předprovozní test systému
- Uvedení do provozu
- Kontrola bezpečnosti



Obr. 41 Diagram postupu návrhu pracoviště

5.1 Výběr pracoviště

Výběr pracoviště, které je vhodné k nasazení kolaborativního robotu je odvislé od zadání. Při konkrétní úloze určené k robotizaci je potřeba provést analýzu proveditelnosti a zhodnotit ekonomický přínos nasazení robotu. Při vytváření nového zadání a neurčitosti dané úlohy mohou být posouzena kritéria uvedená výše, která definují vhodné aplikace pro nasazení robotu:

- Omezený zástavbový prostor
- Zlepšení ergonomie
- Častá změna trajektorie robotu
- Zvýšení kvality
- Odstranění monotónních operací

5.2 Zhodnocení navrhovaného pracoviště

Druhá etapa návrhu pracoviště má zásadní roli v celém procesu realizace nového pracoviště. Vyhodnocením nastavených kritérií získáme přehled o možnostech a omezeních, které budou v návrhu aplikovány, ale také můžeme dojít k závěru, že technologie pro daný problém není vhodná. Motivace k robotizaci pracoviště nebo vytvoření nového robotického pracoviště může být různá. Například zvýšení kvality výroby vytváří odlišné požadavky na výsledné pracoviště než záměr zlepšení ergonomie.

Vstupními daty pro návrh pracoviště jsou informace o výrobním procesu na určeném úseku výroby:

- Obsluha – v případě úpravy stávajícího pracoviště (počet, specifikace činnosti)
- Vstupní polotovary (pozice, orientace, tvar, hmotnost, materiál, informace – výrobní a organizační)
- Výstupní produkty (stejně jako vstupní polotovar, odpad, informace kontrolní)
- Čas výroby daného úseku
- Prostor (rozměry, omezení, dostupnost energií, podmínky prostředí, dostupnost zásobování)

Výstupem této etapy je technické zadání.

5.2.1 Obsluha pracoviště

Jak z názvu vyplývá, při spolupráci robotu s člověkem hraje obsluha v návrhu pracoviště významnou roli. Pokud je úloha obsluhy omezena a vyřazena z procesu výroby nebo je uvažována potenciální přítomnost ostatního personálu v pracovním prostoru robotu během jeho provozu, nejedná se o přímou spolupráci, ale o koexistenci. V tomto případě je potřeba počítat s přítomností personálu, který nemusí být proškolen a vědom si možných bezpečnostních rizik.

Obsluha pracoviště vstupuje do návrhu pracoviště také jako důležitý ekonomický prvek. Investice do robotizace pracoviště je mnohdy hodnocena z pohledu její návratnosti výpočtem ROI (Return on Investment) nebo jiné hodnotící metody. V případě automatizace/robotizace, kdy je obsluha nahrazena strojem/robotem jsou náklady na plat a další výdaje spojené se zajištěním obsluhy vstupují do výpočtu ROI jako významná složka úspor.

V procesu plánování potřeby lidských zdrojů pro dané pracoviště je nejprve pracovní cyklus rozdělen na jednotlivé operace, které jsou následně ohodnoceny z hlediska složitosti automatizace/robotizace. Pro nová pracoviště mohou být jednotlivé operace zjištěny v simulaci nebo z procesu výroby. Při

integraci do stávajícího řešení, jako je tomu u příkladového pracoviště, vychází hodnocení z pozorování aktuálního stavu, který byl od navrhovaného časem optimalizován.

5.2.2 Analýza prostoru

V místě vzniku pracoviště je potřeba provést důkladnou analýzu prostoru a vlastností jednotlivých jeho úseků s ohledem na pohyb obsluhy, pozice stávajících zařízení a prostor pro umístění zařízení nových.

Zejména je důležité identifikovat následující oblasti:

- Prostor, kde se nesmí pohybovat obsluha během operace
- Prostor, kde se bude pohybovat obsluha během operace
- Prostor, kde je umožněn přístup ostatnímu personálu
- Umístění vstupních/výstupních produktů
- Umístění stávajících technologií
- Předpokládané základací/odebírací/technologické pozice pro robot
- Překážky, které by mohly zasahovat do pracovního prostoru robotu
- Plochy nebo konstrukce vhodné pro kotvení nových technologií
- Přístup k energiím
- Světelné podmínky a omezení vztahující se k optickým zařízením důležitým pro bezpečnost

5.2.3 Analýza technologie nebo objektu manipulace

Při návrhu pracoviště se spolupracujícím robotem ovlivňuje technologie na robotu nebo manipulovaný objekt dvě oblasti faktorů. Bezpečnost pracoviště je zásadně ovlivněna všemi zařízeními, které jsou připojeny na průmyslový robot. Robot má deklarován bezpečný provoz dle norem od výrobce po svou koncovou přírubu. Některé koncové efektorů určené pro spolupráci robotu s člověkem mají také definovanou bezpečnost dle norem. Při použití standardních a specializovaných efektorů je potřeba při návrhu počítat s požadavky na bezpečnost a provést důkladnou analýzu rizik. Ověření je potřebné i pro objekt manipulace, který je pro danou aplikaci specifický. Druhou oblastí faktorů jsou ekonomické, které jsou pro návrh pracoviště také zásadní.

Při hodnocení bezpečnosti je potřeba se zaměřit zejména na tyto případy, které jsou běžné u technologií používaných v průmyslové robotice:

- Rychle rotující části (leštění, broušení, ošetřování povrchu plasmou, nástroje třískového obrábění, vřeteno)
- Pohybující se části (čelisti efektoru, aretační přípravky, svařovací kleště)
- Emise tepla (svařovací hlavice, nástroje třískového obrábění, tryska pro nanášení lepidla)
- Emise světla (svařování, laserové technologie)
- Emise prachu, zplodin a toxických látek
- Pro člověka nebezpečné technologie (radioaktivní záření, využití toxických látek)
- Riziko úrazu elektrickým proudem (svařování)
- Přítomnost vibrací a hluku

U objektů manipulace a konstrukčního řešení koncových technologií je potřeba se zaměřit na tvarové a hmotnostní parametry:

- Ostré hrany (Vnější tvar, vystouplý spojovací materiál)
- Špičaté rohy (Vnější tvar, přísavky, nástroje třískového obrábění, nástroje šroubování)
- Nebezpečné mezery a místa možného zachycení
- Riziko zachycení (vnější kabeláž a hadice)
- Vysoká hmotnost, která je nebezpečná při náhlém uvolnění z efektoru
- Nebezpečný povrch objektu manipulace (třísky, teplota, toxické látky)

Některé z technologií představují riziko ve více ohledech. Tyto technologie, jako svařování, třískové obrábění nebo manipulace s objekty vykazujícími zvýšené nebezpečí nejsou pro spolupráci robotu s člověkem vhodné, protože odstranění rizik není zcela možné nebo je ekonomicky náročné.

Ekonomické faktory jsou druhou oblastí, kterou analýza technologie a objektu manipulace ovlivňuje. Na základě této analýzy je možné definovat vhodné komponenty pro návrh pracoviště. Průmyslové roboty určené pro spolupráci robotu s člověkem nejsou vždy dostupné ve více variantách od různých výrobců pro zadané parametry, jako je tomu u standardních robotů. Klíčovými parametry jsou hlavně dosah a nosnost průmyslového robotu.

Kritéria ovlivňující výběr komponent:

- **Odebírací a zakládací místo objektu manipulace** – vzdálenost těchto dvou míst dává spolu s možností umístění robotu základ pro stanovení potřebného **dosahu robotu**, který je klíčovým údajem pro výběr průmyslového robotu. Pozice míst může být statická nebo v tolerancích navrženého systému nebo proměnlivá, což může výsledný systém výrazně ekonomicky ovlivnit. Proměnlivá pozice v malém rozsahu posunutí nebo natočení může být kompenzována funkcí robotů určených pro spolupráci robotu s člověkem – uvolnění kloubů. Větší variabilita pozic musí být řešena kompenzátory nebo silově-momentovými sensory u aplikací s menším rozptylem pozic nebo kamerovým systémem u aplikací s velkou variabilitou pozice.
- **Hmotnost objektu manipulace nebo technologické hlavičky** – ovlivňuje potřebnou **nosnost robotu**. U objektu manipulace je potřeba počítat jak s jeho vlastní hmotností, tak i s hmotností koncového efektoru. U tohoto kritéria je také důležitá poloha těžiště objektu neseného robotem.
- **Dostupnost ploch a tvarů pro úchop** – použití standardních přísavkových/čelistových koncových efektorů, které mohou být i ve verzi pro spolupráci s člověkem může snížit náklady oproti návrhu vytvořenému na míru.
- **Požadavek na vyšší přesnost** – doplnění měřicích zařízení
- **Požadavek na provoz s rizikem** – při požadavku provozu s vyšší než bezpečnou rychlostí, aplikací s nebezpečnými technologiemi nebo manipulací s nebezpečnými předměty je nutné pracoviště monitorovat a zabezpečit, aby nedošlo k nebezpečnému kontaktu. Snahou je co nejmenší omezení obsluhy v pohybu po pracovišti, a to vhodnou kombinací bezpečnostních zařízení.

5.3 Předprovozní test systému

Jedním z trendů robotizace je vytvoření digitálního dvojčete zařízení, tedy virtuální předlohy systému s možností simulace funkce zařízení. Jsou zde simulovány jak dráhy robotu, pohyby periferních zařízení, tak i propojeno simulační prostředí s fyzickým zařízením a virtuální model reaguje na výstupní signály již nainstalovaných částí výsledného systému. Simulační SW umožňuje umístění a pohyb figuríny reprezentující obsluhu pracoviště. SW Tecnomatics Process Simulate umožňuje pokročilejší simulaci přítomnosti obsluhy se stanovením obálky pohybu nebo analýzu ergonomie.

V případě, že obsluha dynamicky mění svou polohu na pracovišti, není tento pohyb jednoduše definovatelný v simulaci. Do návrhu jsou zařazeny testy prováděné přímo na pracovišti pro ověření správnosti nastavení bezpečnostních funkcí zabezpečovacích zařízení a kinematických parametrů robotu.

Během předprovozního testu jsou ověřovány následující situace:

- Doběhový čas robotu při narušení hlídané zóny
- Nárazové síly při vybraných kolizních situacích

5.3.1 Doběhový čas robotu při narušení hlídané zóny

V technické specifikaci ISO/TS 15066 jsou popsány postupy pro výpočet dráhy, kterou robot urazí před zastavením po aktivaci bezpečnostního zastavení. Veličina je důležitá pro jeden ze způsobů spolupráce – Monitorování rychlosti a vzdálenosti. V této konfiguraci robot přizpůsobuje své chování na základě pozice obsluhy v pracovním poli robotu. Při narušení oblasti, ve které se robot pohybuje musí robot zastavit. Jedním ze vstupních údajů výpočtu je doba, za kterou robot zareaguje po narušení prostoru. Tento čas není tabulkový údaj, ale je závislý na konkrétní robotické aplikaci. Čas může být odhadnut na základě reakčního času robotu, pokud je ale robot na průmyslové sběrnici, závisí doběhový čas na použité komunikační sběrnici, počtu účastníků na sběrnici a případně řídicím PLC. Tento čas je tedy pro přesnou konfiguraci zón výhodnější změřit.

Měření doběhového času je prováděno na základě normy ČSN EN ISO 13855 – *Bezpečnost strojních zařízení – Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla*. Zařízení funguje na principu měření změny polohy enkodérem. Zařízení má 3 části. Zastavovací jednotka může být ve formě bezpečnostního hříbku pro zastavení stroje nebo praporku, který protne paprsek bezpečnostních prvků, ať už se jedná o světelné závory nebo bezpečnostní scanner. Druhým zařízením je enkodér s lankovým navijákem pro lineární odměřování, rotační enkodér pro měření rotačních pohybů nebo optický sensor pro zaznamenání rychlých pohybů. Naviják je připevněn (magneticky) na pevnou základnu. Lanko navijáku je pak připevněno na robot nebo pohyblivou část stroje, kde bude doběh měřen. Třetí částí je vyhodnocovací jednotka. Při tomto měření se nemusí sledovat celá trajektorie robotu, ale jsou vybrány úseky, kde dochází k rychlým přesunům.

5.3.2 Nárazové síly při vybraných kolizních situacích

Pokud dojde ke kontaktu stroje s obsluhou, musí tento kontakt splňovat určité limity, aby nedošlo ke zranění. Kontakt je možný v případě spolupráce robotu s člověkem v režimu omezení síly a výkonu. Přípustné hodnoty jsou těžko stanovitelné a záleží na výšce, odolnosti, citlivosti, aktuálního stavu obsluhy a mnoha dalších faktorech. V ISO TS 15066 je v příloze A tabulka přípustných hodnot, které byly stanoveny na základě testování v laboratoři. Na vzorku osob byly testovány limity, kdy už je člověku kolize nepříjemná v různých oblastech na těle. V tabulce je vždy přípustná hodnota síly a tlaku na danou část těla při kvazistatickém kontaktu, dále je zde multiplikátor, kterým je možné vypočítat hodnotu při kontaktu pomíjivém. Tyto hodnoty by neměly být na pracovišti překročeny. Síly a tlaky nejde jednoduše vypočítat, když dochází ke kolizi v různých rychlostech a polohách obsluhy a stroje.

Hodnoty je možné pro některé vybrané situace – výběr se opět odvíjí z posouzení nebezpečnosti daného pohybu a možnosti kolize/přímáčknutí – simulovat v simulačním SW, kde je podmínkou mít 3D model pracoviště nebo provést měření.

Při měření je zjišťován průběh síly působení zařízení v čase a dále může být vyhodnocen tlak nárazové plochy na měřidlo. Měření síly probíhá na tenzometrickém členu, kterému musí být předřazen pružný člen z důvodu částečného pohlcení energie a měření tlaku. Pružný člen má vlastnosti jako oblasti lidského těla, do kterých může robot narazit. Tyto hodnoty se v různých částech těla mění, protože je rozdíl, jestli robot narazí do svalu končetiny člověka, dojde ke kontaktu v oblasti kloubu nebo v oblasti měkkých částí těla jako je břicho. Konstanty pružnosti jednotlivých oblastí jsou taktéž v příloze A technické specifikace ISO TS 15066 a byly experimentálně odvozeny. Pružný člen tvoří buď vyměnitelná pružina, která má parametry pružnosti částí lidského těla nebo je použita gumová deformační podložka opět s danými vlastnostmi.

Měření probíhá ve vybraných situacích, kde je vyhodnoceno, že by mohlo dojít ke kolizi, která by mohla překročit přípustné limity. Může se jednat například o tyto vybrané stavy:

- Pohyb robotu proti pevné překážce
- Pohyb ramen robotu proti sobě a tím hrozící možnost přiskřípnutí
- Rozjezd robotu do prostoru, kde je očekávaná přítomnost obsluhy
- Rotace s manipulovanou součástí v prostoru, kde je očekávaná přítomnost obsluhy
- Zavírání čelisti robotu nebo provoz jiné technologie na konci ramene robotu

Ve výše zmíněných případech je měřena nárazová síla při kvazistatickém kontaktu. Měřicí zařízení je umístěno na pevnou podložku v trajektorii pohybu robotu. Robot je spuštěn a v průběhu pohybu narazí na testovací podložku, která zaznamená působení síly.

Toto měření je platné pro určitou konfiguraci robotu, tedy konfiguraci limitních parametrů pro detekci kolize (síla, výkon, rychlost, hybnost...) a také pro určité nastavení zrychlení a rychlosti robotu. Při změně těchto parametrů musí být měření provedeno znovu.

5.4 Uvedení do provozu

Po instalaci pracoviště do výrobní linky a jeho důkladném otestování je vhodné zařadit před uvedením pracoviště do provozu testovací období. Během tohoto období jsou vyhodnoceny:

- Trajektorie robotu a jeho zastavovací pozice
- Rychlost pohybu robotu
- Ergonomie ovládání a interakce s robotem
- Funkce bezpečnostních prvků
- Provoz systému za standardních i výjimečných podmínek

Důležitým testem je kapacitní zkouška pracoviště, kdy je změřena délka pracovního taktu v běžném provozu. Při zařazení pracoviště do výrobní linky, nesmí být linka blokována. U pracovišť s operacemi vykonávanými obsluhou není čas procesu přesně definovaný a musí tak být provedeno měření.

6 Návrh prototypového pracoviště

V rámci spolupráce s firmou ŠKODA AUTO a.s. byl proveden návrh prototypového pracoviště, na kterém byl ověřen postup a kontrola návrhu pracoviště se spolupracujícím robotem. Na základě návrhu byl realizován systém, který je zařazen do provozu. V práci jsou použita data z této realizace relevantní k tématu práce, kompletní dokumentace je duševním vlastnictvím firmy a nebyla zde zveřejněna. Úkolem spolupráce bylo:

- Ověření možností dostupných spolupracujících robotů
- Nalezení pracoviště ve svařovně, kde by bylo možné nasadit spolupracující robot
- Návrh úpravy vybraného pracoviště
- Konzultace návrhu s oddělením bezpečnosti, standardizace, údržby, technologie...
- Provedení testů
- Příprava zadávací dokumentace
- Komunikace s firmami k realizaci projektu

Zadáním bylo vyhodnotit příležitosti nasazení spolupracujícího robotu na svařovně a následný návrh pracoviště a jeho realizace. Operace prováděná na svařovně automobilky jsou vysoce automatizovány a možnosti další automatizace jsou v několika konkrétních oblastech:

- Logistika
- Úklid
- Zakládání dílů do vstupních přípravků a dopravníků
- Kontrola kvality
- Montážní a jiné manuální operace

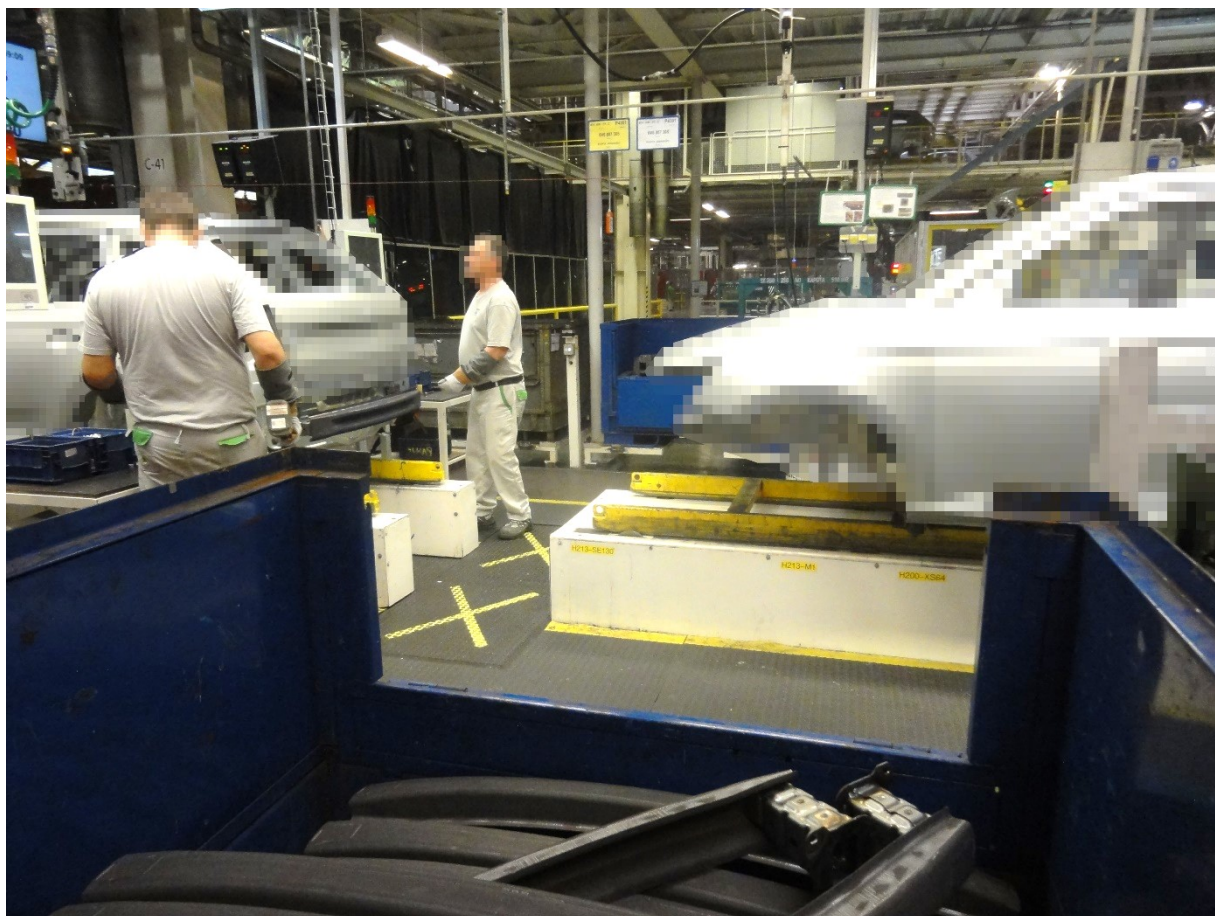
Logistika a úklid spadají do oblasti mobilní robotiky a nebyly zahrnuty do vyhodnocení vhodné aplikace. Zakládání dílů do vstupních přípravků a dopravníků je úloha rozdělená na vybírání dílů z logistických přepravních boxů a zakládání do definovaných pozic. Pokud jsou díly v transportním boxu pravidelně uspořádány, jedná se o jednoduchou úlohu manipulace. V případě neuspořádaných dílů je úloha označovaná jako Bin Picking a je to komplexní úloha s použitím kamerového systému. V analyzovaném úseku výroby byly přítomny přepravní boxy s orientovanými díly, kterými byly plechové výlisky. Ty představují riziko pro obsluhu z důvodu ostrých hran. Drobné díly, které by nepředstavovaly riziko při manipulaci jsou uloženy v transportních boxech neorientovaně. Tato oblast byla z výběru také vyloučena.

Kontrola kvality je specifickou oblastí, která může být automatizována. V oblasti svařovny dochází k velkému množství odchylek od požadovaného standardu a pracovník provádějící kontrolu kvality hned tyto problémy řeší. Z důvodu vysoké rozmanitosti možných nedokonalostí a jejich řešení byla tato oblast také vyloučena z možných návrhů.

Oblast montážních a manuálních operací, které jsou prováděny ve svařovně byla vyhodnocena jako nejvhodnější pro pilotní projekt z důvodu jednoduchosti operací a ekonomickému potenciálu případné automatizace/robotizace. Vybrána byla 2 pracoviště s potenciálem vytvoření pracoviště se spolupracujícím robotem:

- **Nanášení lepidla na pásnici prahu** – operace, kde je podlouhlý plechový díl založen do přípravku a po obvodu nanese lepidlo obsluhou pracoviště. Po nanesení lepidla je díl odložen do jiného přepravního boxu.
- **Montáž nosníku zadního nárazníku** – dva pracovníci upevňují a montují díl na zadní část karoserie vozu. Třetí člen obsluhy vychystává díly, které je nutné u některých modelů těsnit nanesením lepidla.

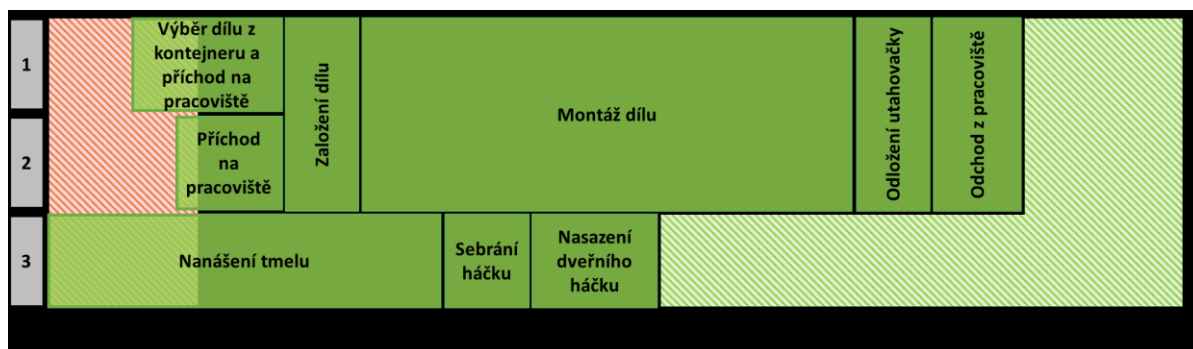
Na základě detailní analýzy obou pracovišť byl vyhodnocen vyšší potenciál u druhé aplikace z důvodu možnosti ekonomické výhody při částečném nahrazení manuální práce operátorů robotem a možným snížení počtu osob.



Obr. 42 Vybrané pracoviště vhodné pro robotizaci

6.1 Analýza obsluhy

Na pilotním pracovišti je ve stavu před úpravou obsluha v počtu 3 pracovníků. Dva pracovníci provádějí hlavní úkon montáže a třetí zajišťuje přípravu. Na obrázku Obr. 43 je vyobrazen sled činností jednotlivých pracovníků v rámci 55vteřinového pracovního cyklu. Prvních 7 vteřin taktu (v obrázku šrafováno červeně) přejíždí karoserie na dopravníku, a je tedy omezen přístup na pracoviště. Samotná montáž dílu trvá dvěma lidem 18-25 vteřin podle typu dílu. V případě bezproblémové montáže vzniká časová rezerva 10-12 vteřin. Nanese těsnicího tmelu spolu s jeho přípravou probíhá v 15-18 vteřinách a při požadavku několika dílů tohoto typu by mohlo docházet k brzdění výrobní linky.



Obr. 43 Rozpis činností jednotlivých pracovníků v průběhu pracovního cyklu před úpravou pracoviště

V Tab. 3 je uveden výčet operací na příkladovém pracovišti. Každá operace má uvedenu časovou náročnost vztaženou na jednoho pracovníka a hlavní problémy, které jsou řešitelné způsobem uvedeným ve sloupci možná řešení, dle kterých je hodnocena náročnost automatizace. Hodnocení ve třech úrovních je navrženo následovně:

- Nízká: standardní problém s nízkou finanční náročností
- Střední: komplexní problém s finančně náročným řešením
- Vysoká: zásadní problém s finančně náročným řešením a přesahem změn do jiných fází výroby

Tab. 3 Výčet operací s časovou náročností na jednoho pracovníka

ID	Operace	Doba	Problémy k řešení	Možná řešení	Náročnost automatizace
1	Výběr dílu z kontejneru	3s	Díly v kontejneru jsou neorientované a mohou být zaklíněné nebo vzpříčené	Bin Picking, Robotické palety	vysoká
2	Manipulace s dílem	3s	Tři různé díly	Univerzální efektor	nízká
3	Nanášení tmelu	18s	Tmel je nanášen na díl nebo karoserii dle typu karoserie	Lepicí pistole na robotu, Částečná automatizace	nízká/střední
4	Nasazení dílu na místo montáže	5s	Přidržené háčky pro pověšení nejsou v přesně definované pozici	Kamerový systém, Silový sensor na robotu	střední
5	Přidržení nestabilního dílu	5s	Jeden z dílů nemá přidržené háčky	Detekce kolize/doteku	nízká
6	Montáž dílu	45s	Dva typy spojovacího materiálu, díry/ šrouby nejsou v přesně definované pozici, díry pro šrouby mohou být nepřesné, díry pro šrouby jsou v zákrytu nosníku a pozice se u různých dílů liší	Systém výměny nástroje, Kamerový systém, Speciální utahovačka	vysoká
7	Nasazení dveřního háčku	5s	Karoserie není v přesně definované pozici	Kamerový systém	střední

Podrobnější popis operací je uveden v Příloha č.1 – detailní popis hodnocení operací na pracovišti. Vyhodnocením operací z pohledu náročnosti automatizace vzhledem k časové náročnosti provádění jednotlivých činností obsluhou poskytuje doporučení pro výběr úloh vhodných k automatizaci.

Tab. 4 Zhodnocení operací z pohledu časové vytiženosti obsluhy vzhledem k náročnosti automatizace

ID	Doba	Náročnost automatizace	Porovnání	Doporučení
6	45s	vysoká	Vysoké vytižení/vysoká náročnost	Zachovat
3	18s	nízká/střední	Střední vytižení/nízká(střední)náročnost	Automatizovat
4	5s	střední	Nízké vytižení/střední náročnost	Zachovat
5	5s	nízká	Nízké vytižení/nízká náročnost	Automatizovat
7	5s	střední	Nízké vytižení/nízká náročnost	Zachovat
1	3s	vysoká	Nízké vytižení/vysoká náročnost	Zachovat
2	3s	nízká	Nízké vytižení/nízká náročnost	Automatizovat

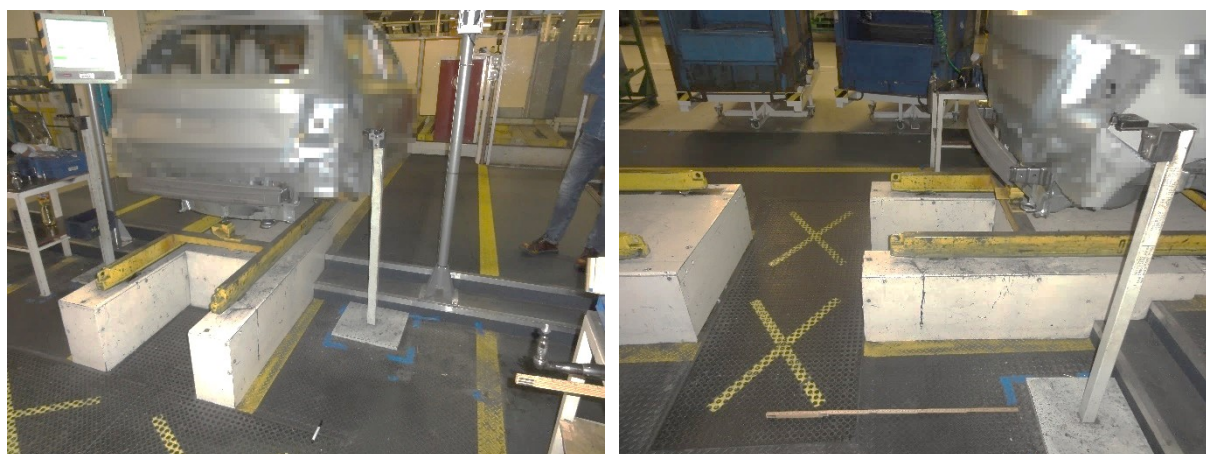
Na základě analýzy obsluhy je zřejmé, že úlohu je možné částečně automatizovat a částečně ponechat v původním stavu. Tato úloha je tedy vhodná pro spolupráci robotu s člověkem. Z pohledu návratnosti investice je vhodné automatizovat operaci nanášení tmelu, a tím snížit počet obsluhy ze 3 na 2 pracovníky. Automatizací operace manipulace bude dosažena příznivější ergonomie pracoviště.

Analýza návratnosti investice byla konzultována s oddělením nákupu zadavatelské firmy a na základě snížení počtu pracovníků pracovišti byla vypočítána návratnost 1,86 roku, což je hodnota ve dvouletém limitu pro návrh standardních pracovišť. Konkrétní čísla v práci nejsou uvedena z důvodu použití neveřejných informací a nerelevantních údajů o cenách, které jsou specifické pro konkrétní firmu.

Pokud by byla dostupná hodnotící kritéria pro ergonomii pracoviště, výsledná hodnota by mohla být ještě snížena. Na pilotním projektu byla vyhodnocena pouze ergonomická způsobilost pracoviště.

6.2 Analýza prostoru

Vybrané pracoviště bylo analyzováno a popsáno dle aktuálního stavu.

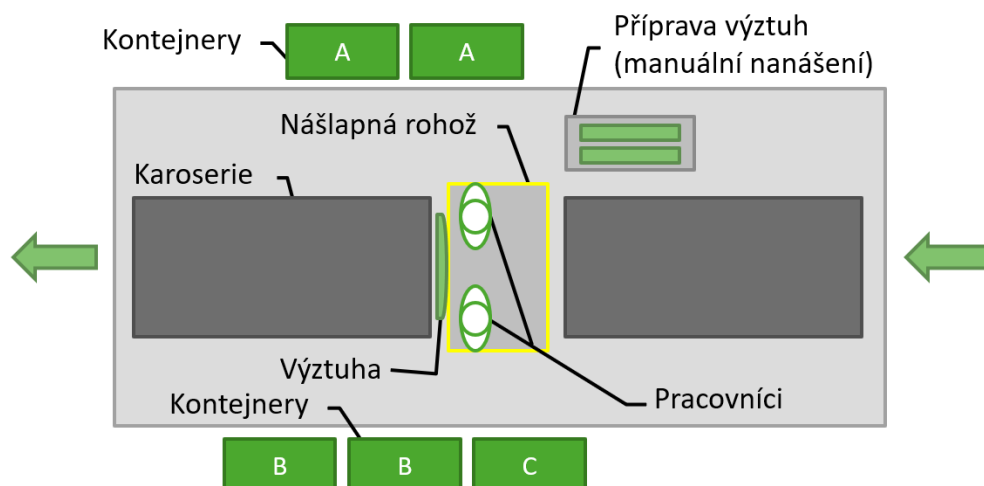


Obr. 44 Stav pracoviště před změnami v pohledu zezadu (vlevo) a ze strany (vpravo)

Pracoviště je umístěno na poslední pozici dopravníku karoserií. Kolem dopravníku je vyvýšená podesta, po níž se pracovníci pohybují kolem karoserií. Dopravník tvoří stoly jednotlivých montážních pozic, mezi kterými karoserie na začátku taktu přejíždí. Mezi jednotlivými stoly je průchod s bezpečnostní nášlapnou rohoží zabraňující pojezdu karoserií v přítomnosti obsluhy. Prostor nad touto rohoží musí

být v době přejezdu prázdný a rohož z důvodu zachování bezpečnostní koncepce dopravníku nesmí být upravena. Podesta je 1 m od zadní hrany stolu o 340 mm zvýšena dvěma schody. Okolní plochy podesty nemohou být zastavěny z důvodu zásobování. Prostor pro umístění nového zařízení tvoří 1,5 m široký pás po obou stranách karoserie v délce cca 7 m.

Obsluha musí mít zachován přístup do kontejnerů s výztuhami nárazníku, kterých jsou na pracovišti 3 druhy (A, B, C viz Obr. 45.). Dále musí mít přístup k zadní části vozu, kde probíhá montáž. V prostoru se mohou pohybovat i další osoby provádějící montáž, zásobování a ostatní činnosti.



Obr. 45 Zjednodušené schéma pracovního prostoru (není v měřítku)

V prostoru přípravy výztuh se nachází přívod tlakového vzduchu a také těsnicího tmelu, který je využíván při montáži jedné z výztuh. Výztuha je polohována do prostoru nad nášlapnou rohoží za karoserii vozu pro následnou montáž. Pozice není pevná z důvodu nestejné pozice karoserie při zastavení dopravníku.

6.3 Návrh pracoviště a výběr komponent

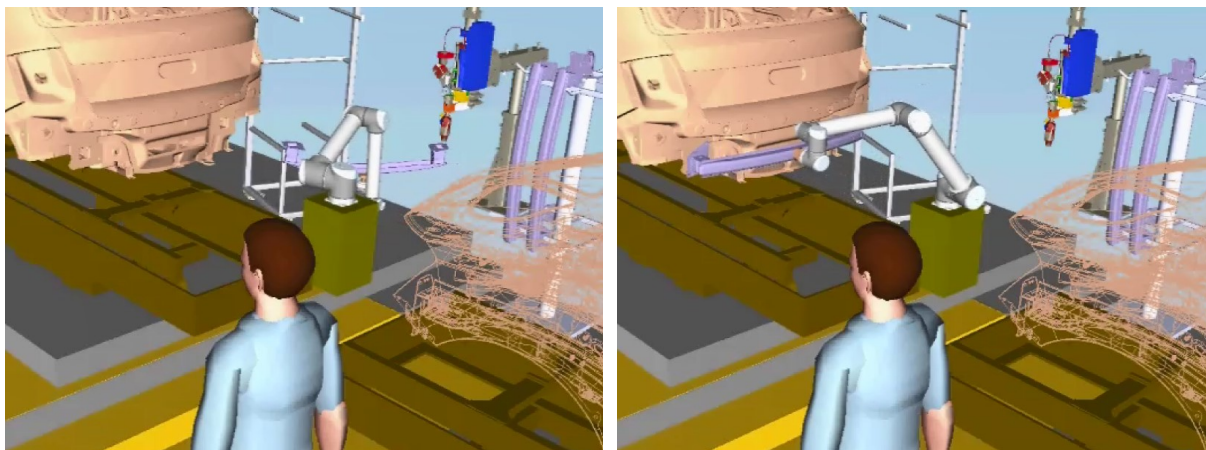
Zhodnocením pracoviště dle analýz uvedených v předchozí kapitole lze definovat požadavky na komponenty tohoto pracoviště. Výstupem analýzy operací prováděných obsluhou jsou 3 úkony vhodné pro automatizaci: nanášení tmelu, manipulace s dílem a přidržení nestabilního dílu. Zjednodušenou simulací bylo ověřeno, že všechny 3 operace může provádět 1 robotický manipulátor. Z analýzy prostoru a objektu manipulace byly definovány požadavky na průmyslový robot:

- **Dosah:** Robot musí být umístěn mimo profil linky a mít dosah do poloviny karoserie. Minimální dosah je tak 870 mm jako polovina karoserie + 170 mm pro umístění mimo nášlapnou rohož. Celková hodnota je minimálně **1040 mm**.
- **Nosnost:** Hmotnost nosníku je 4,5 kg + hmotnost uchopovače v optimálním poměru 1:1. Minimální nosnost manipulátoru tak byla stanovena **9 kg**.
- **Zástavbové rozměry:** Robot se nachází na průběžné montážní lince a nesmí omezovat operátory v pohybu. Zástavbové rozměry tak musí být **minimální**.

Z dostupných kolaborativních robotů na českém trhu splňují požadavky:

- Universal Robots UR10 (nosnost 10 kg, dosah 1300 mm)
- Fanuc CR35iA (nosnost 35 kg, dosah 1813 mm)

Z důvodu významně menších rozměrů, požadavků na zástavbu a dostupnosti potřebných funkcí navádění robotu zvolen robot: **Universal Robots UR10**



Obr. 46 Simulace vybraných činností

6.4 Popis navrhovaného pracoviště

Zadáním je integrace robotického asistenta do pracoviště montáže výztuhy zadního nárazníku. V současnosti výztuhu připevňují dva pracovníci a jeden výztuhu vychystává.

Na projektovaném pracovišti bude lidská obsluha pracovat v přítomnosti aktivního robotu, na pracovišti tedy bude probíhat spolupráce robotu s člověkem. Pracoviště bude průchozí s přístupem k robotu a bez využití oplocení v cestách, kde bude potřeba zajistit průchod. Z tohoto důvodu je potřeba vypracovat náležitý bezpečnostní koncept.

Zařízení na pracovišti plní funkci manipulátoru, kdy podává obsluze výztuhu nárazníku z odběrného místa a tím dochází ke zlepšení ergonomie pracoviště. Zároveň je robot využit v technologické operaci – nanášení těsnicího tmelu na definované dráze. Dané požadavky splňuje průmyslový robot z kategorie spolupracujících robotů.

Na stávajícím pracovišti jsou montážní stoly, mezi kterými se přesouvají karoserie na podpůrné konstrukci – SKIDu. Mezi jednotlivými stoly je průchozí mezera s bezpečnostní nášlapnou rohoží zajišťující bezpečné přejetí karoserie na následující stůl. Do této technologie není žádoucí zasahovat (možné je pouze využít informace z nášlapné rohože po konzultaci s osobou zodpovědnou za linku). Nové pracoviště bude využívat okolních prostor ze stran karoserie.

Na pracovišti probíhá montáž výztuhy nárazníku na tři modely. Pro každý model je výztuha jiná. Robot bude obsluze asistovat při montáži dvou typů výztuh. Jeden z typů (A) vyžaduje nanášení těsnicího tmelu, ten je aktuálně nanášen ruční pistolí. Na pracovišti je pistole na balanceru určená pro nanášení těsnicího tmelu buď na dosedací plochy výztuhy, nebo na karoserii. Kvůli nutnosti nanášení tmelu na karoserii a také v rámci konceptu nouzové strategie musí být ruční pistole zachována.

Robot plní tři různé funkce:

- Nanesení těsnicího tmelu na výztuhu
- Manipulace výztuhy do montážní polohy
- Přidržení nestabilního dílu

Robot bude vykonávat tři různé operace podle aktuální potřeby a vyráběného modelu. Operace č. 1 připravuje díl pro jeden ze tří vyráběných modelů (A), tato operace probíhá vždy, když není potřeba asistence robotu pro montáž a není plný zásobník připravených dílů. Operace č. 2 je asistence montáže dílu na model A, probíhá vždy, když přijede na stanoviště tento model. Operace č. 3 je asistence montáže dílu na model B, probíhá vždy, když přijede na stanoviště tento model. Třetí model C nevyžaduje žádnou součinnost s robotem.

Popis operace č. 1 – Nanesení těsnicího tmelu na výztuhu

- Odebrání dílu z odběrné pozice – najetí robotu do odebírací polohy, upnutí dílu do uchopovače
- Nanesení těsnicího tmelu – manipulace dílu pod statickou externí lepičku, pohyb robotu po definované dráze pro nanesení tmelu (ovládání extruderu lepičky)
- Odložení dílu do zásobníku – najetí robotu do odkládací polohy, odepnutí dílu z uchopovače

Popis operace č. 2 – Manipulace výztuhy do montážní polohy

- Odebrání dílu ze zásobníku – najetí robotu do odebírací polohy, upnutí dílu do uchopovače
- Manipulace dílu do přibližné polohy – manipulace dílu za karoserii do přibližné montážní polohy
- Manipulace dílu do přesné polohy – rozvolnění robotu pro najetí do přesné montážní polohy obsluhou
- Odjetí robotu mimo karoserii – odepnutí dílu z uchopovače vyvolané obsluhou, odjezd robotu mimo karoserie

Popis operace č. 3 – Přidržení nestabilního dílu

- Najetí robotu mezi karoserie – příjezd robotu s prázdným uchopovačem do prostoru za nasazenou výztuhu na karoserii
- Přítlak výztuhy na karoserii – přitlačení nestabilní výztuhy vyvolaný obsluhou (obsluha dá signál robotu)
- Odjetí robotu mimo karoserii – odjezd robotu mimo karoserie vyvolaný obsluhou

Po asistované manipulaci dílu do montážní polohy obsluha provede nasazení šroubů/matic a jejich dotažení.

Zařízení se skládá z následujících komponentů:

- Robot (spolupracující robot)
- Uchopovač s přitlačnou konzolí
- Konstrukce pro upevnění robotu
- Vstupní zásobník
- Externí statická lepička (extruder) se stojanem
- Zásobník připravených dílů
- Řídicí systém pracoviště
- Bezpečnostní a signalizační zařízení

Požadavky na robot:

Z analýzy potřebného dosahu, nosnosti a zástavbových rozměrů byl vybrán robot UR10 od firmy Universal Robots.

Požadavky na uchopovač:

Uchopovač robotu musí držet díl – výztuha zadního nárazníku pro model A. Díl nesmí vypadnout ani při ztrátě energií. Design uchopovače musí být navržen s ohledem na možnou kolizi s obsluhou jako je eliminace ostrých hran, otvorů, kde by mohlo dojít k přiskřípnutí. Operace robotu č. 2 (uvedena výše) vyžaduje manipulaci s dílem uchopeným v uchopovači. Pro tyto účely bude vybaven ergonomickými madly s ovládacími prvky pro rozvolnění robotu a uvolnění dílu. Madla budou v dostatečné vzdálenosti od středu výztuhy, aby byla zajištěna snadná manipulace. S ohledem na nosnost robotu musí být hmotnost uchopovače minimální, využití balanceru není přípustné. Uchopovač musí být vybaven také kontaktní plochou pro přitlačení výztuhy při vykonávání operace č. 3.

Požadavky na konstrukci pro upevnění robotu:

Robot nesmí překážet ve volném pohybu obsluhy na pracovišti. V rámci nouzové strategie bude robot se svým podstavcem snadno a rychle demontovatelný z pracoviště. Umístění robotu nesmí bránit obsluze v montáži ze strany karoserie.

Požadavky na vstupní dopravník:

Odebírací místo dílů bude řešeno dopravníkem, aby byla zajištěna stálá odebírací poloha a zároveň bylo připraveno 20 dílů bez nutnosti asistence obsluhy. Ze zásobníku bude možné získat informaci o přítomnosti dílu v odebírací poloze a v jedné průchozí poloze (uprostřed) pro kontrolu zaplnění dopravníku. Dopravník má odebírací pozici v dosahu robotu a plnicí pozici v blízkosti kontejneru s díly.

Požadavky na externí statickou lepičku:

Lepička bude napojena na stávající systém pomocí rozbočky na hadici s tmelem. Ovládání extruderu bude řízeno řídicím systémem pracoviště/robotu.

Požadavky na zásobník připravených dílů:

Kapacita odkládacího zásobníku bude 6 dílů ve dvou úrovních (2x3). Přítomnost dílů na jednotlivých pozicích bude zjistitelná.

Požadavky na řídicí systém pracoviště:

Pracoviště bude napojeno na řídicí systém linky po konzultaci s autorem linky.

Požadavky na bezpečnostní a signalizační zařízení:

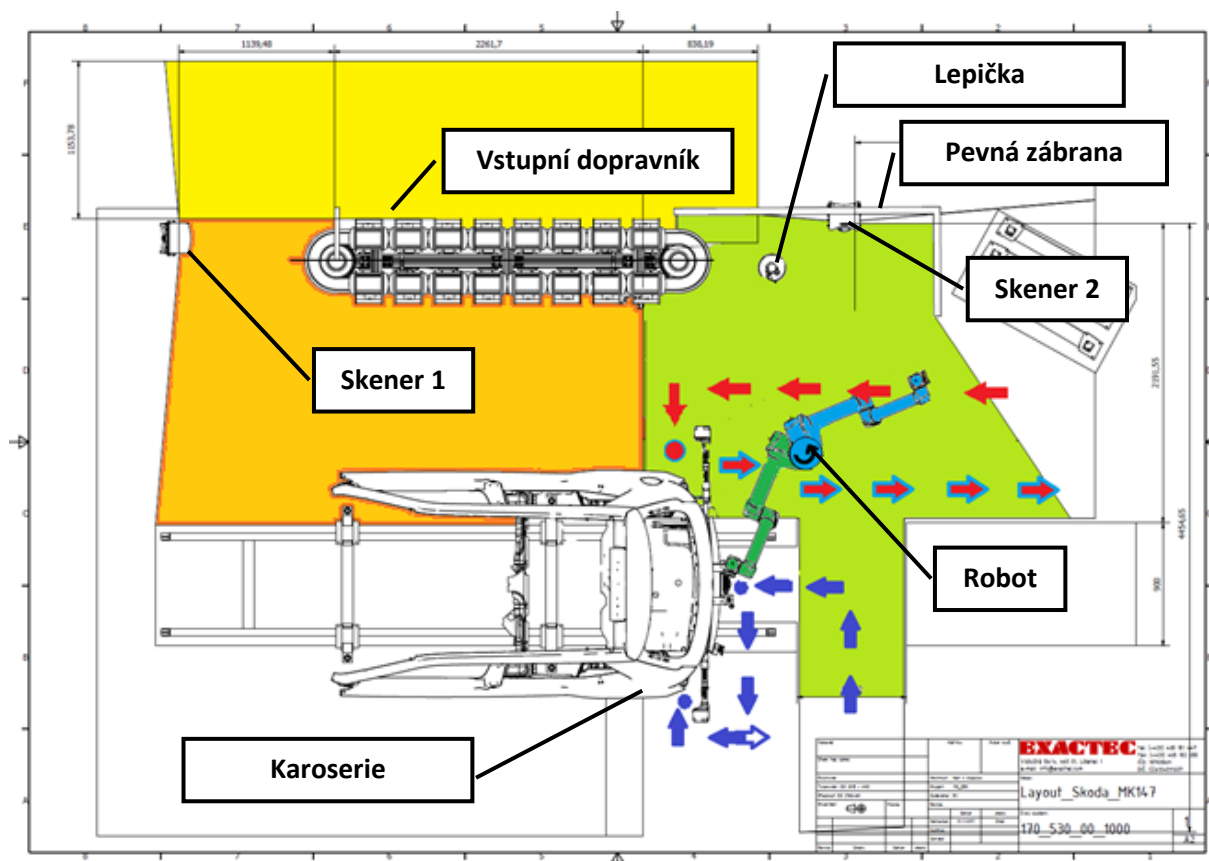
Pracoviště nebude využívat pevných zábran v místech, kde bude potřeba zachovat volný průchod. Z důvodu manipulace s dílem, který má ostré hrany nesmí dojít ke kolizi obsluhy s pohybujícím se robotem se založeným dílem. Přístup k robotu je možný ze dvou směrů, z prostoru mezi karoseriemi a ze směru předchozího pracoviště linky. Ze směru přípravného zásobníku není přístup nutný, bude zde tedy pevná zábrana (může být součástí zásobníku). Ze strany vstupního dopravníku je přístup zamezen dopravníkem a další pevnou zábranou, která na něj navazuje. Nášlapná rohož je využita jako zóna zpomalení u operace č. 1, v ostatních operacích jako zóna zastavení. Prostor, kde probíhá operace č. 1 je ošetřen laserovým zónovým scannerem z důvodu možnosti provozu robotu ve vyšší rychlosti. V dosahu robotu s dílem je zóna zastavení robotu, na kterou navazuje zóna zpomalení.

Pracoviště bude obsluze světelně signalizovat možnost vstupu do bezpečnostních zón (světelný pás na podlaze), potřebu naplnění vstupního zásobníku, provádění operace č. 1 (může probíhat kdykoliv není robot využíván) a další nezbytné stavy.

6.5 Návrh bezpečnostního konceptu

Po základním odhadu komponent a jejich předběžném rozestavení bylo navrženo rozestavení bezpečnostních prvků. V základním návrhu je počítáno se dvěma bezpečnostními skenery a pevnou zábranou v prostorách nedovoleného přístupu. Hlavním zdrojem rizika na pracovišti byl vyhodnocen objekt manipulace – výztuha. Při pohybu výztuha představuje riziko kvůli ostrým hranám. Výztuha je v pohybu na vstupním dopravníku a při manipulaci mezi dopravníkem a lepičkou a lepičkou a prostorem za karoserií vozu. Skener 1 slouží k detekci vstupu obsluhy k dopravníku z obou jeho stran. Při přítomnosti obsluhy ve žluté zóně je blokován pohyb dopravníku. Při vstupu do oranžové zóny je blokován dopravník, a také robot. Zelená zóna sledovaná skenerem 2 je detekční oblastí pracovního prostoru robotu. Velikost zóny je navržena s ohledem na minimální bezpečnou vzdálenost popsanou dále v kapitole 6.7.1.

Prostor lepičky je ze zadní strany skeneru 2 zabezpečen pevnou stěnou, která zamezuje vstup do prostoru lepičky během manipulace dílu robotem a je tak výrazně snížena bezpečná vzdálenost ze strany chráněné touto zábranou.

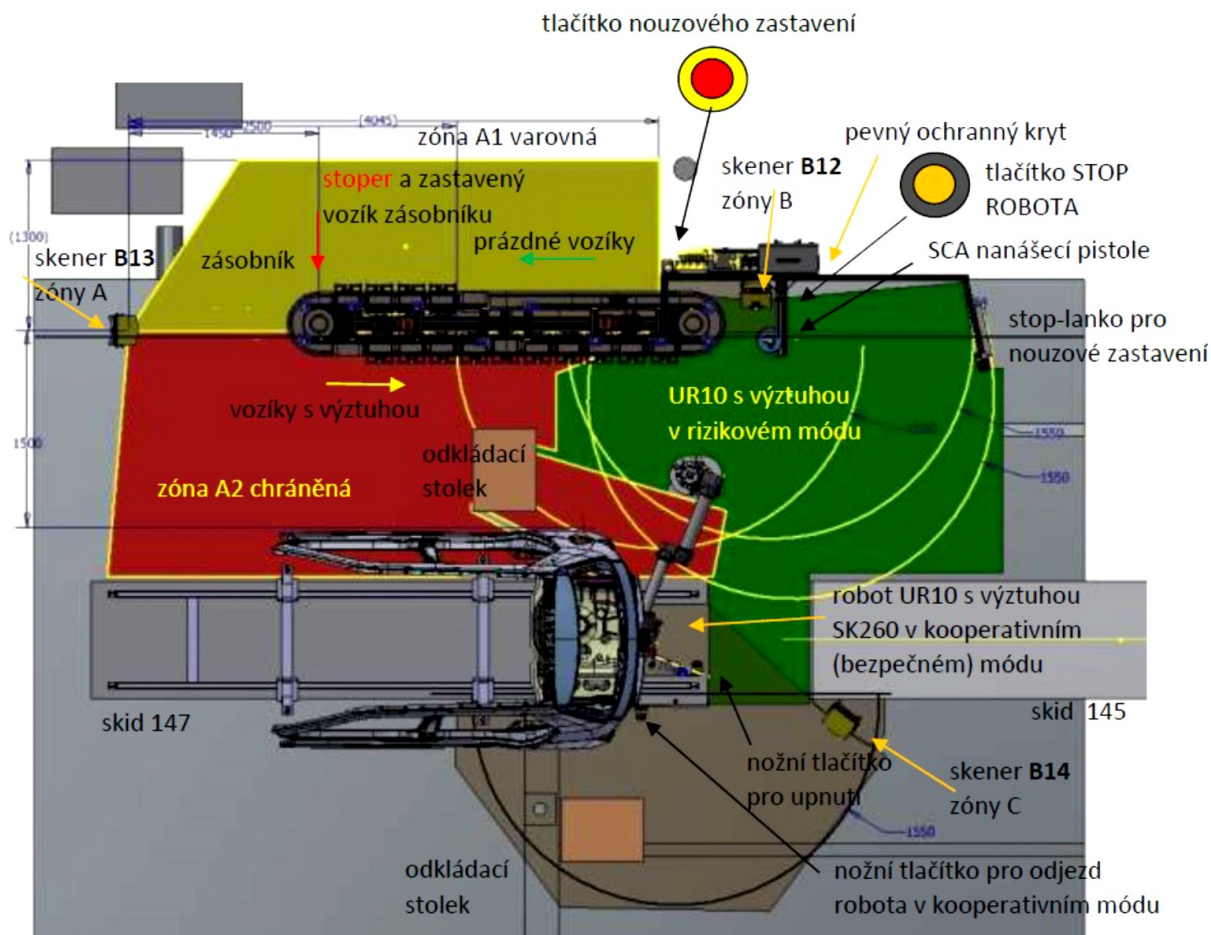


Obr. 47 Návrh bezpečnostního konceptu

Šipkami je vyznačen pohyb pracovníků v průběhu pracovního procesu. Modrou barvou je označen pracovník přistupující z levé strany, který v případě modelu B nasazuje nestabilní díl, aktivuje přítlak robotu a následně přechází na svou montážní pozici. Červenou barvou označený pracovník vstupuje na svou montážní pozici v zelené konfiguraci robotu. Při dotažení prvních šroubů je robot odvolán a vrací se do čekací pozice (modrá), obsluze se tak uvolní prostor odchodu z levé strany robotu.

Finální bezpečnostní koncept zpracovaný realizátorskou firmou zahrnuje bezpečnostní prvky, který již byly součástí linky před integrací robotu a doplněny další dva bezpečnostní prvky. U vstupního dopravníku je přidáno tlačítko nouzového zastavení, které zastaví běh celé linky. Ze strany pracoviště

jsou po obou stranách linky bezpečnostní lanka se stejnou funkcí, která byla zachována v původním stavu. Druhou změnou je přidání třetího laserového skeneru pro rozšíření sledované zóny pohybu robotu se založeným objektem manipulace. Tento skener byl přidán, aby minimální bezpečná vzdálenost byla dodržena i od nejbližšího konce objektu manipulace vzhledem k pracovníkovi přistupujícímu z levé strany karoserie.



Obr. 48 Bezpečnostní layout navržený realizující firmou

6.6 Výsledná podoba pracoviště a změny oproti zadání

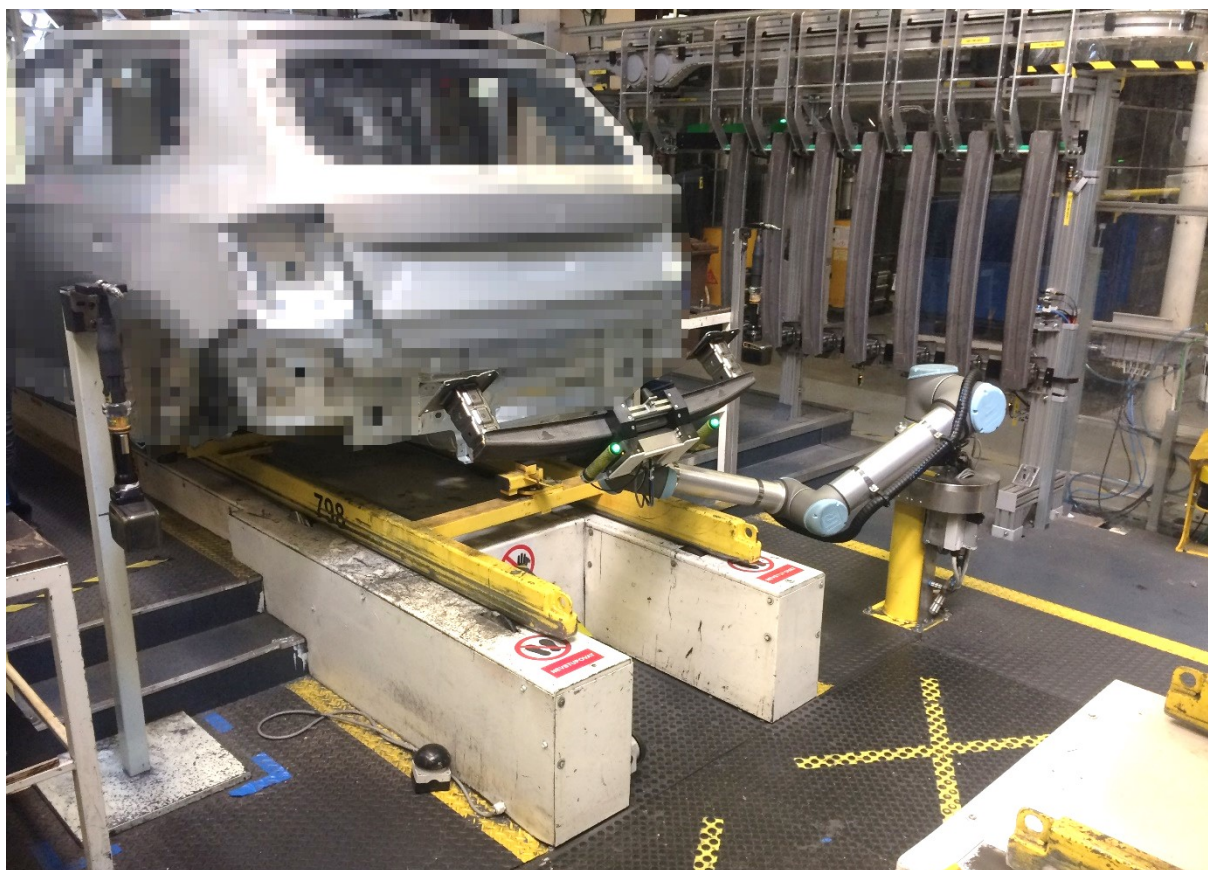
Z důvodu zjednodušení a požadavku technologů byl odstraněn zásobník vychystaných dílů, aby lepidlo nezůstávalo dlouho nanášené bez použití dílu. Díl s nanášeným lepidlem je přímo polohován za karoserii pro montáž.

Signalizace obsluhy byla zjednodušena z důvodu použití standardizovaných dílů pouze na informační maják. Ohraničení zón sledovaných bezpečnostním skenerem je realizováno žlutou páskou. Bezpečnostní koncept byl zjednodušen na dva stavy reakcí bezpečnostních skenerů. Při manipulaci s dílem je při narušení sledované zóny robot okamžitě zastaven. Při manipulaci bez dílu robot jede definovanou rychlostí a skenery do provozu robotu nezasahují.

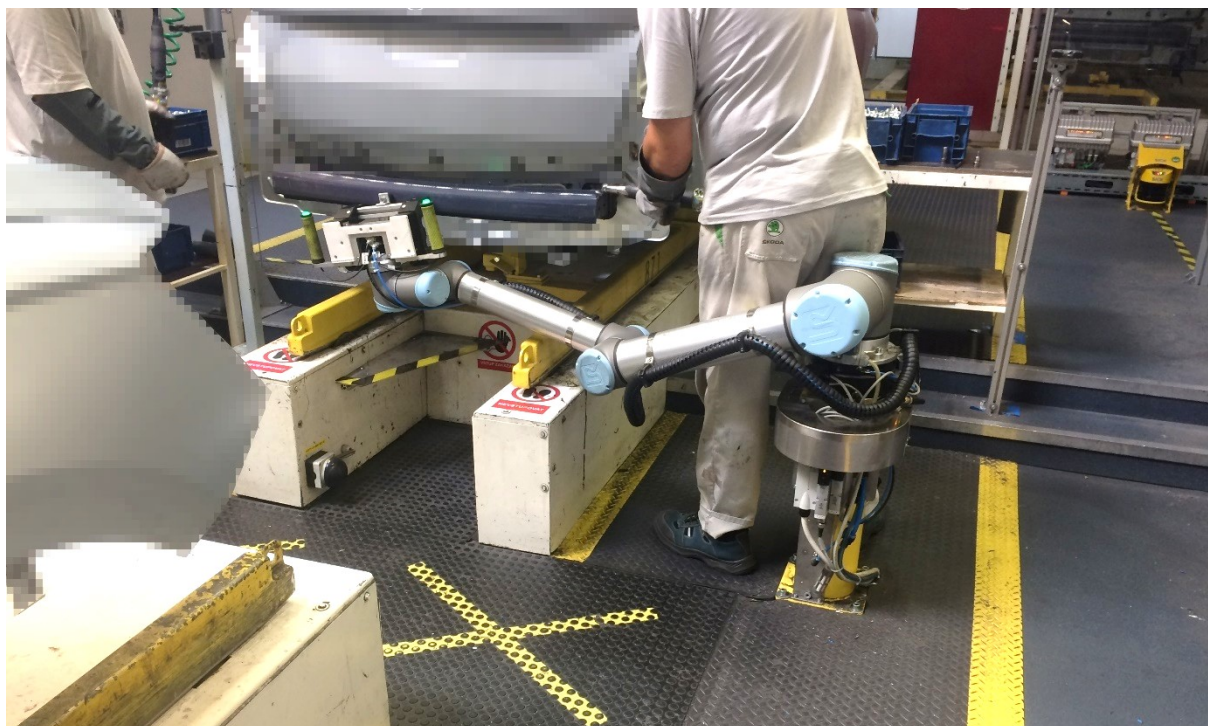
Finální uspořádání pracoviště jde vidět na následujících obrázcích. Robot po odebrání dílu z dopravníku manipuluje díl pod statickou lepičku viz Obr. 49, kde je na obě kontaktní plochy nanášen tmel. Následně je díl manipulován za karoserii vozu (Obr. 50). Do zastavení robotu v této pozici je prostor hlídán bezpečnostním skenerem a při vstupu obsluhy je robot zastaven. Po zastavení mohou přistoupit pracovníci (Obr. 51) a díl přimontovat.



Obr. 49 Robot manipuluje díl pod statickou lepičku



Obr. 50 Robot s vyloženým dílem



Obr. 51 Obsluha šroubuje nestabilní díl přidržovaný robotem

6.7 Předprovozní test systému

V případě pilotního projektu jde o velice dynamické prostředí, kde pohyby obsluhy se v každém pracovním cyklu mohou velmi lišit a zároveň vysokou rozmanitostí prováděných operací není možné virtuálně ověřit pracoviště. Navrhovaná aplikace byla vyhodnocena jako riziková z důvodu nevelkých zkušeností s tímto typem aplikací jak ze strany zadavatelské, tak dodavatelské firmy. Pro odhalení možných rizik a nedostatků v aplikaci bylo navrženo provedení předprovozního testu před implementací zařízení na finální pozici ve výrobní hale. Pracoviště bylo sestaveno ve stejné dispozici mimo finální umístění, aby mohl být celý proces výroby simulován.

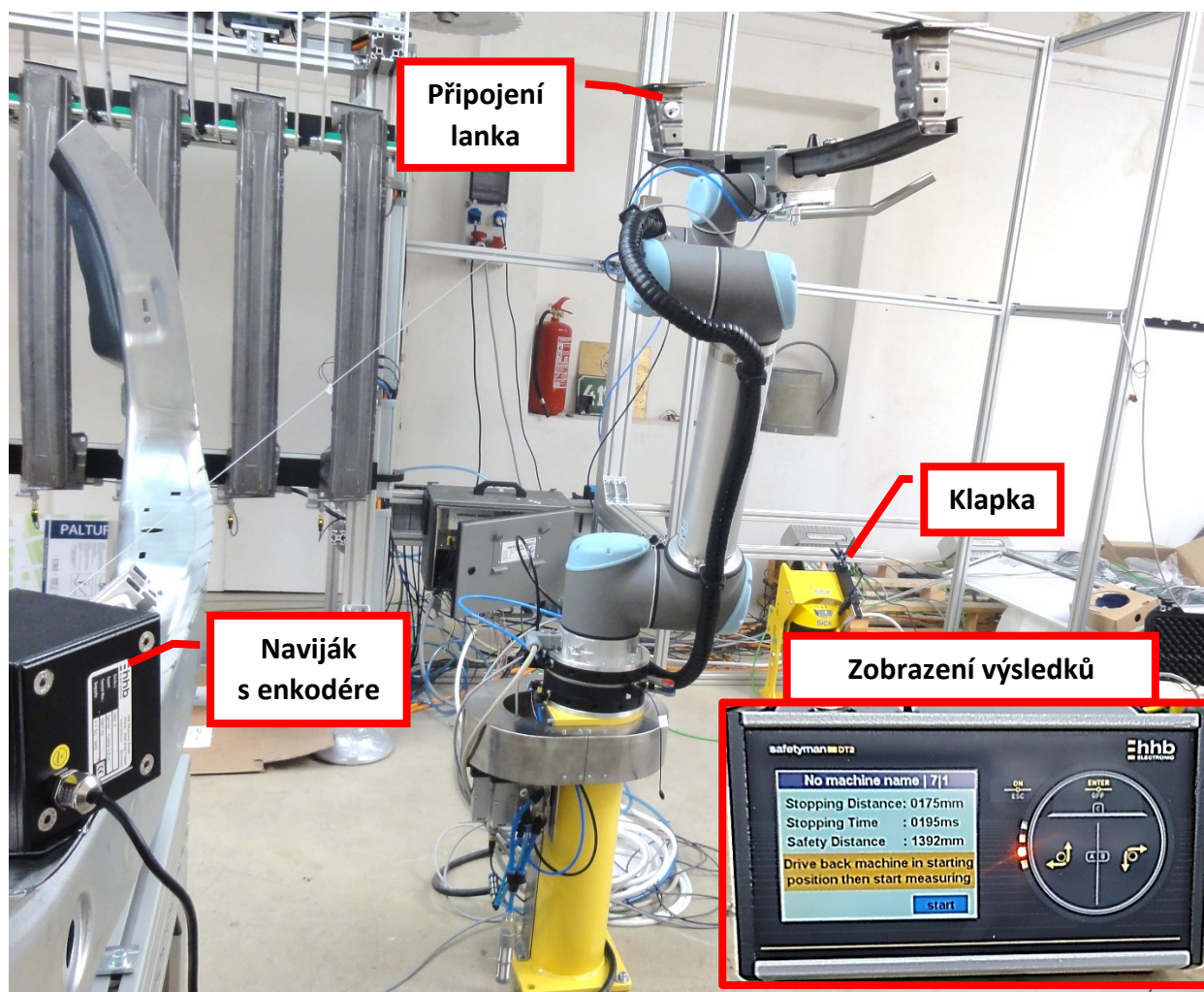


Obr. 52 Předprovozní test – přiložení dílu ke karoserii (vlevo), vstupní dopravník a lepička (vpravo)

Aby měření bylo prokazatelné oficiálním certifikátem a použita specializovaná zařízení pro daná měření, situace pro ověření byly vytipovány autorem práce a následně zkontrolovány a změřeny firmou Sick za asistence autora práce.

6.7.1 Doběhový čas robotu při narušení hlídané zóny

V průběhu pohybu robotu se založeným dílem v efektoru se musí obsluha nacházet v dostatečné vzdálenosti od pracovního prostoru robotu. Měření bylo provedeno systémem HHB Safetyman DT2. Systém měří čas a vzdálenost doběhu při narušení hlídané zóny. Klapka umístěná na bezpečnostní skener simuluje narušení pracovního prostoru v čase (Obr. 53), kdy robot dosáhne maximální rychlosti při provádění sledovaného pohybu. Čas zastavení je určen z referenčního průjezdu před měřením. Naviják s přesným enkodérem SMD5 -3M zaznamenává navinutí lanka, které je upevněno na nejrychleji pohybující se bod na robotu, v tomto případě je upevněno na díl. Výsledkem měření je čas mezi pohybem klapky a zastavením navíjení lanka, tedy čas od narušení sledovaného prostoru do úplného zastavení robotu. Měření probíhá na základě měření změny vzdálenosti, výstupem je tak i dráha ujetá robotem po dobu jeho zastavování.



Obr. 53 Měření doběhového času (detail na vyobrazení výsledků)

V testu byly provedeny dvě sady měření pro pohyb robotu v prostoru dopravníku a lepičky (Sada 1) a druhé měření s vyloženým ramenem do prostoru za karoserii vozu (Sada 2). Klíčovou veličinou je čas doběhu, doběhová vzdálenost a orientační návrh vzdálenosti je u Sady 2 uveden jen ilustračně.

Deset měření doběhového času bylo zaznamenáno měřicím přístrojem a průměrná hodnota času doběhu je 208 ms v první sadě a 176 ms v sadě druhé. Tato hodnota reakčního času odpovídá testovanému systému, tedy robotu a bezpečnostnímu skeneru připojenému k testovacímu PLC. Ve finální aplikaci bude systém napojen na PLC linky. Čas tedy může být ovlivněn počtem ostatních

účastníků průmyslové sběrnice a dalšími faktory, které mohou být ověřeny až v reálném prostředí. Do měření byla zařazena empirická hodnota 20 ms zastupující tyto faktory. K naměřené hodnotě je připočtena chyba měření měřicího zařízení 4 ms a detekční čas laserového skeneru 60 ms, tyto hodnoty jsou uvedeny v katalogu výrobců.

Tab. 5 Měření doběhového času a vzdálenosti

Číslo měření	Čas doběhu [ms]	Čas doběhu [ms]	Doběhová vzdálenost [mm]	Navrhovaná bezpečnostní vzdálenost měřicím zařízením [mm]
	Sada 1	Sada 2		
1	195	175	163	1360
2	214	174	163	1358
3	206	165	157	1344
4	203	159	151	1334
5	221	158	151	1332
6	197	194	144	1390
7	212	180	168	1368
8	203	171	163	1353
9	197	196	144	1393
10	237	186	136	1377

Bezpečná vzdálenost obsluhy od pohybujícího se stroje na pracovišti hlídaném laserovým skenerem s vodorovnou rovinou detekce je vypočítána dle vzorce (1).

$$S = (K \cdot T) + 1200 - 0,4 \cdot H \quad (1)$$

K je rychlost přiblížení obsluhy do nebezpečného místa a dle příslušné bezpečnostní normy je tato hodnota 1600 mm/s. T je vypočítaný celkový čas doběhu stroje a H je výška skenovací roviny nad podlahou pracoviště je zvolena dle podmínky (2), kde d je rozlišení skeneru a levá strana nesmí být menší než 0. Pro dané pracoviště s rozlišením skeneru 70 mm byla zvolena výška H 300 mm.

$$15 \cdot (d - 50) < H < 1000 \quad (2)$$

Tab. 6 Výsledky měření bezpečné vzdálenosti na základě času doběhu

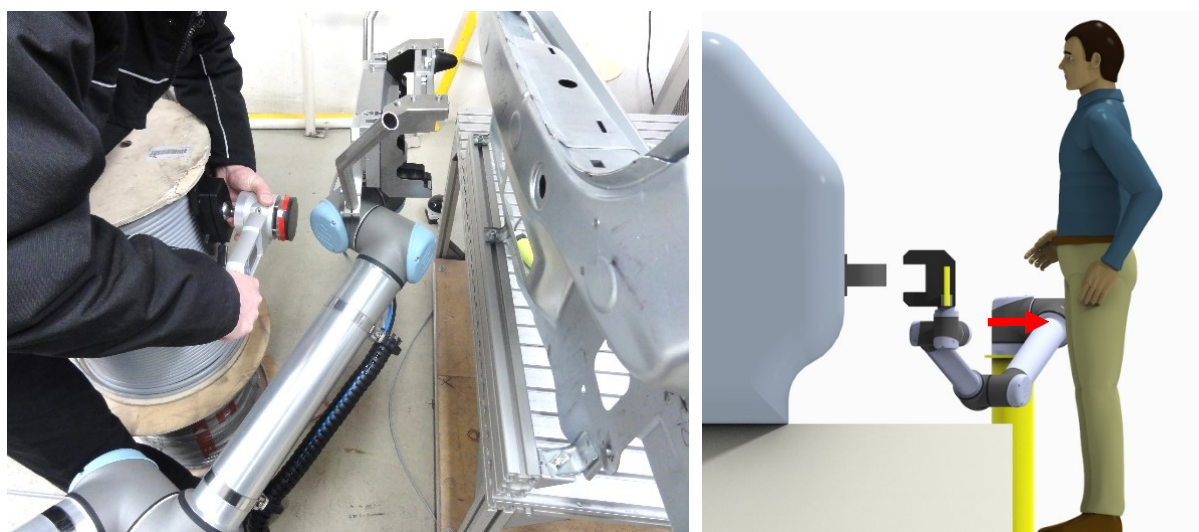
Sada	K [mm/s]	T _{měření} [s]	T _{skener} [s]	T _{chyba} [s]	H [mm]	S [mm]
1	1600	0,208	0,060	0,004	300	1514
2	1600	0,176	0,060	0,004	300	1464

Výsledkem analýzy je návrh minimální bezpečné vzdálenosti obsluhy od pohybujícího se robotu se založeným dílem v jeho efektoru. Vzdálenost byla vypočtena ve dvou oblastech působení robotu. Oblast v okolí dopravníku a lepičky (Sada měření 1) ovlivní obsluhu na pravé straně linky a oblast za karoserií vozu (Sada měření 2) ovlivní obsluhu přistupující na pracoviště z levé strany.

6.7.2 Nárazové síly při vybraných kolizních situacích

Měření bylo realizováno systémem KMG 500 KOLROBOT od firmy GTE, které má rozsah měření do 500 N a nejistotu měření ± 15 N. Tlak byl zaznamenán na fólii citlivou na tlak, která byla následně naskenována a vyhodnocena systémem FUJI LLW s rozsahem měření do 300 N/cm² a nejistotou měření ± 30 N/cm².

Pro měření byly vytipovány situace, ve kterých může dojít ke kolizi robotu s obsluhou. První situace je lineární odjezd robotu směrem od karoserie, kde zápěstní kloub robotu může přijít do kolize v oblasti pánevní kosti u osob nižšího vzrůstu. Běžně může dojít ke kolizi v oblasti stehenní kosti. Měření bylo provedeno pro obě oblasti. Níže je uvedeno měření vztažené k oblasti kosti stehenní, která by mohla být v běžných podmínkách zasažena.

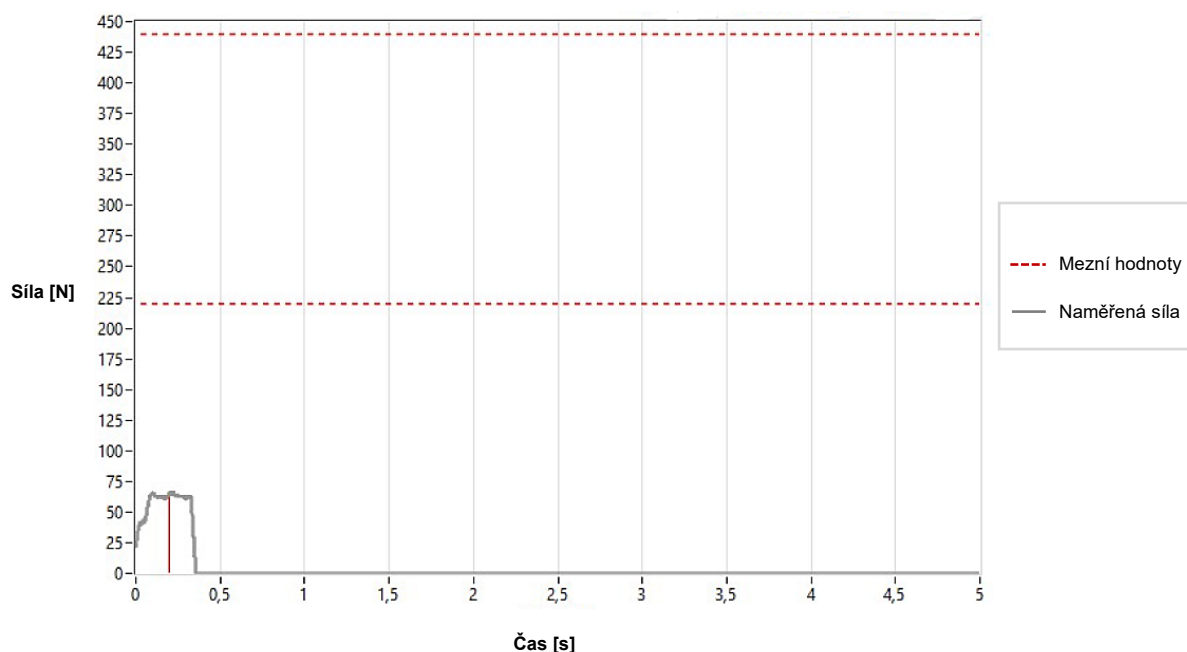


Obr. 54 Měření nárazu v oblasti stehenní kosti

Tab. 7 Měření nárazové síly č.1

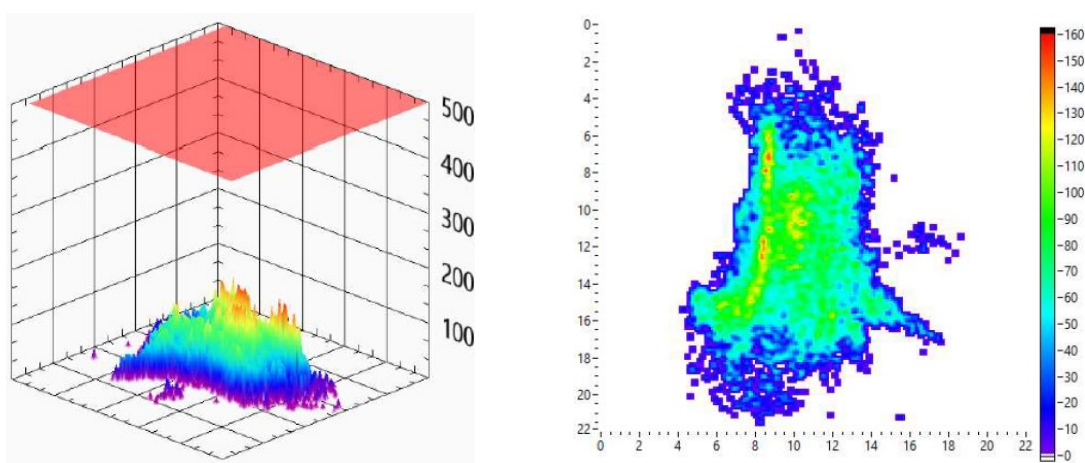
Oblast nárazu na těle člověka	Stehenní kost
Mezní hodnota nárazové síly – kvazistatický kontakt	220 N
Mezní hodnota nárazové síly – tranzientní kontakt	440 N
Mezní hodnota tlaku – kvazistatický kontakt	250 N/cm ²
Mezní hodnota tlaku – tranzientní kontakt	500 N/cm ²
Nastavená maximální rychlost koncového bodu robotu	80 mm/s
Nastavená mezní síla robotu	100 N
Frekvence kontaktu	zřídka
Uvažovaný typ kontaktu	tranzientní
Naměřená síla	67 N
Naměřený tlak	152 N/cm²

Z měření vyplývá, že zjištěná hodnota vyhovuje mezní hodnotě pro oblast stehenní kosti. Při kolizi ve zkoumané situaci nedochází k ohrožení obsluhy.



Obr. 55 Graf průběhu nárazové síly v měření č.1

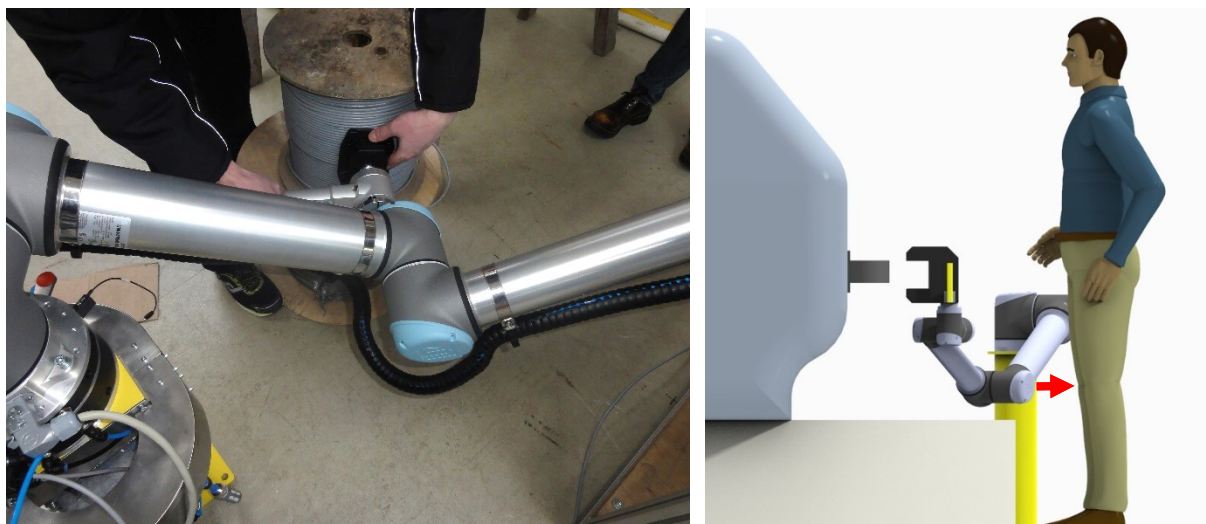
V grafu průběhu síly (Obr. 55) dojde v čase 0,2s k zastavení robotu při překročení síly 67 N, což je vyhodnoceno jako kolizní stav. Po bezpečnostním zastavení robotu dojde k úplnému uvolnění tlaku, kterým robot působí na tělo operátora.



Obr. 56 Grafické vyjádření působení tlaku měření č.1 – 3D graf (vlevo), 2D graf (vpravo) v N/cm^2

V grafu působícího tlaku (Obr. 56) je identifikovatelná hrana zápěstního kloubu robotu. Konstrukčním řešením tohoto kloubu, tedy plastové krytky se zaoblenými hranami nedochází k nebezpečnému překročení limitních hodnot.

Druhou situací je možný náraz robotu do kolene operátora při stejném pohybu robotu, tedy lineárním odjezdu směrem od karoserie. Tato situace může nastat velmi zřídka, pokud by pracovník šel opačným směrem, než je jeho následující montážní pozice.

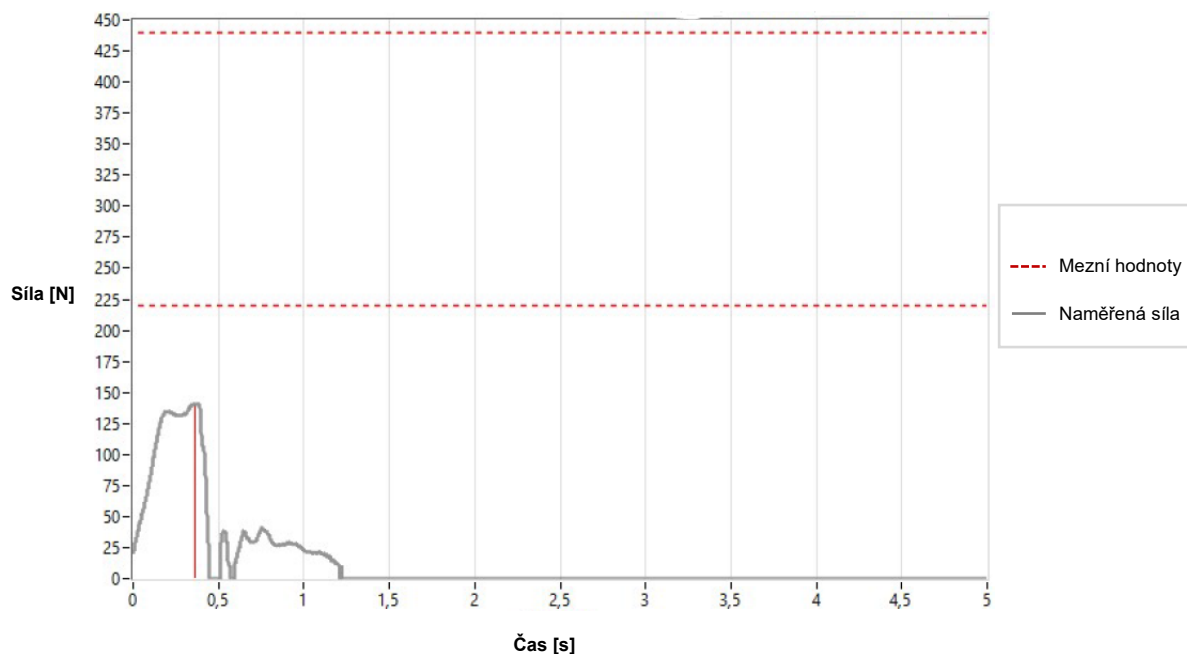


Obr. 57 Měření nárazu v oblasti kolene

Tab. 8 Měření nárazové síly č.2

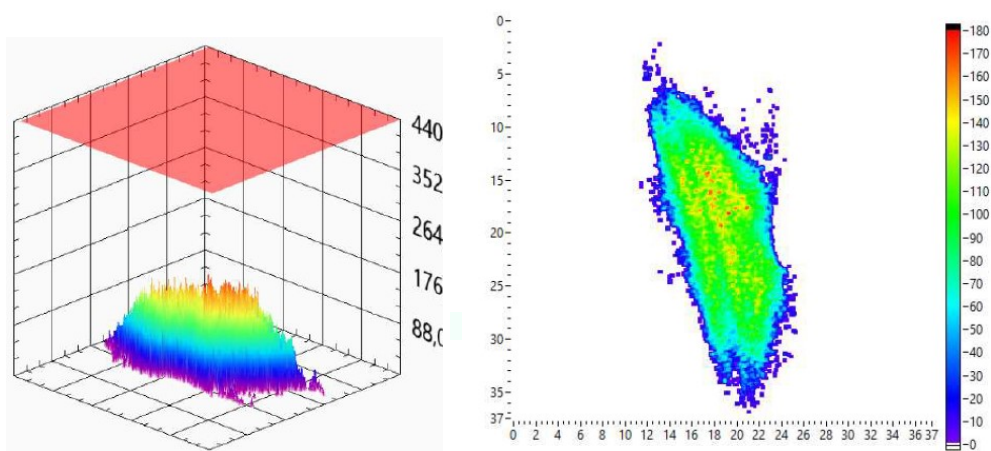
Oblast nárazu na těle člověka	Koleno
Mezní hodnota nárazové síly – kvazistatický kontakt	220 N
Mezní hodnota nárazové síly – tranzientní kontakt	440 N
Mezní hodnota tlaku – kvazistatický kontakt	220 N/cm ²
Mezní hodnota tlaku – tranzientní kontakt	440 N/cm ²
Nastavená maximální rychlost koncového bodu robotu	80 mm/s
Nastavená mezní síla robotu	100 N
Frekvence kontaktu	velmi zřídka
Uvažovaný typ kontaktu	tranzientní
Naměřená síla	141 N
Naměřený tlak	179 N/cm²

Síla nárazu zjištěná v měření č.2 splňuje bezpečnostní limity a nedochází tak k ohrožení obsluhy pracoviště.



Obr. 58 Graf průběhu nárazové síly v měření č.2

V grafu průběhu síly (Obr. 58) je dosaženo maximální hodnoty síly 141 N v čase 0,4s. Robot po zastavení uvolní tlak působící na obsluhu, ale dojde ještě k prokmitu a působení síly 40 N. Limitní hodnota pro kolenní kloub není překročena.



Obr. 59 Grafické vyjádření působení tlaku měření č.2 – 3D graf (vlevo), 2D graf (vpravo) v N/cm^2

V grafu působícího tlaku (Obr. 59) není zřetelná žádná výrazná hrana a tlak je rozložen rovnoměrně. Maximální hodnota $179 \text{ N}/\text{cm}^2$ je způsobena nečistotami nebo drobnými nerovnostmi povrchu krytky.

Ve třetím měření je zkoumána situace, kdy robot se skládá do minimálního vyložení. Při tomto pohybu se článek mezi ramenním kloubem robotu a loktem spolu s článkem mezi loktem a zápěstím přibližují k sobě a může dojít k sevření obsluhy mezi tyto články. Do sevření se může dostat ruka nebo předloktí, a také oblast pánve, pro kterou jsou limity přísnější a analýza je tak zaměřena na tuto oblast. Pohyblivá část robotu může přitlačit obsluhu proti statické základně robotu a může tak dojít ke kvazistatickému kontaktu.

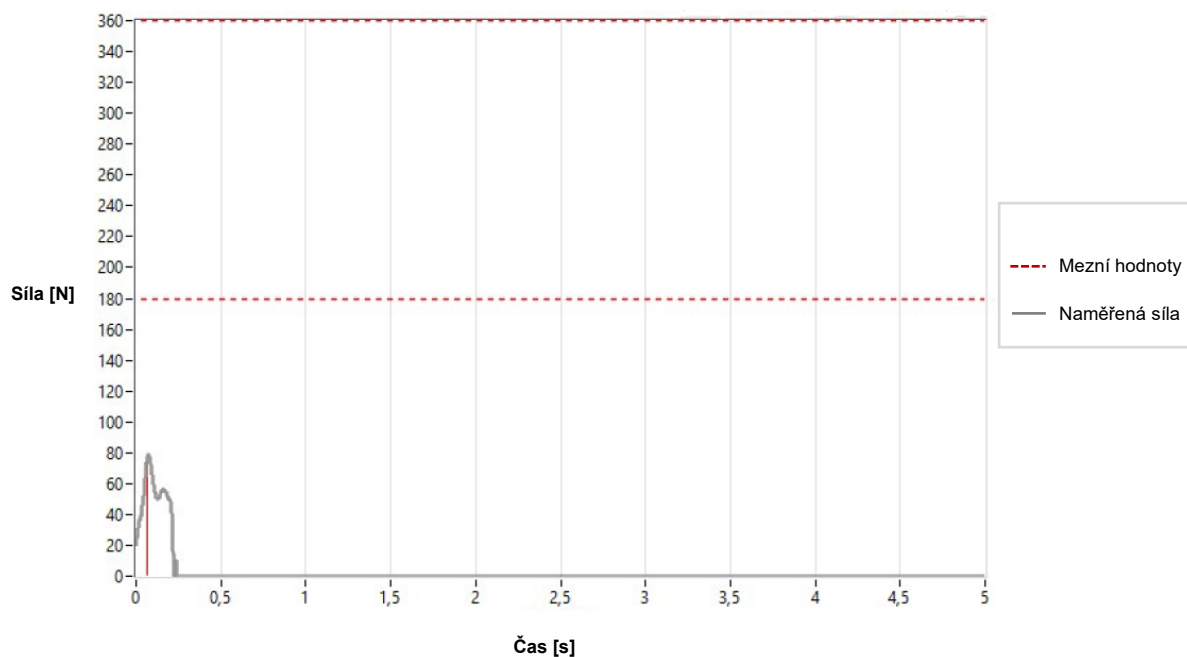


Obr. 60 Měření síly sevření při přiskřípnutí mezi klouby robotu

Tab. 9 Měření nárazové síly č.3

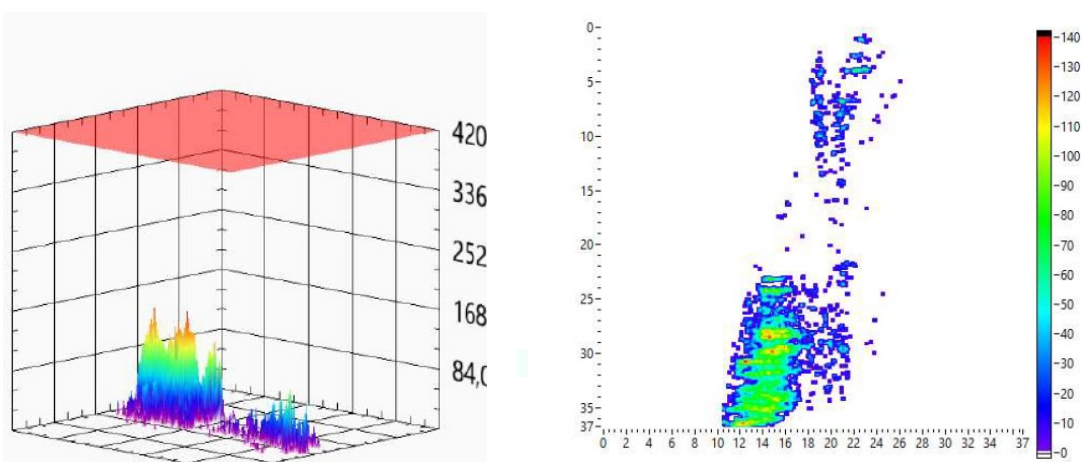
Oblast nárazu na těle člověka	Pánevní kost
Mezní hodnota nárazové síly – kvazistatický kontakt	180 N
Mezní hodnota nárazové síly – tranzientní kontakt	360 N
Mezní hodnota tlaku – kvazistatický kontakt	210 N/cm ²
Mezní hodnota tlaku – tranzientní kontakt	420 N/cm ²
Nastavená maximální rychlost koncového bodu robotu	40 °/s
Nastavená mezní síla robotu	100 N
Frekvence kontaktu	zřídka
Uvažovaný typ kontaktu	kvazistatický
Naměřená síla	79 N
Naměřený tlak	139 N/cm²

Naměřená hodnota 79 N splňuje i přísnější limit pro kvazistatický kontakt, ke kterému může během pohybu robotu dojít.



Obr. 61 Graf průběhu nárazové síly v měření č.3

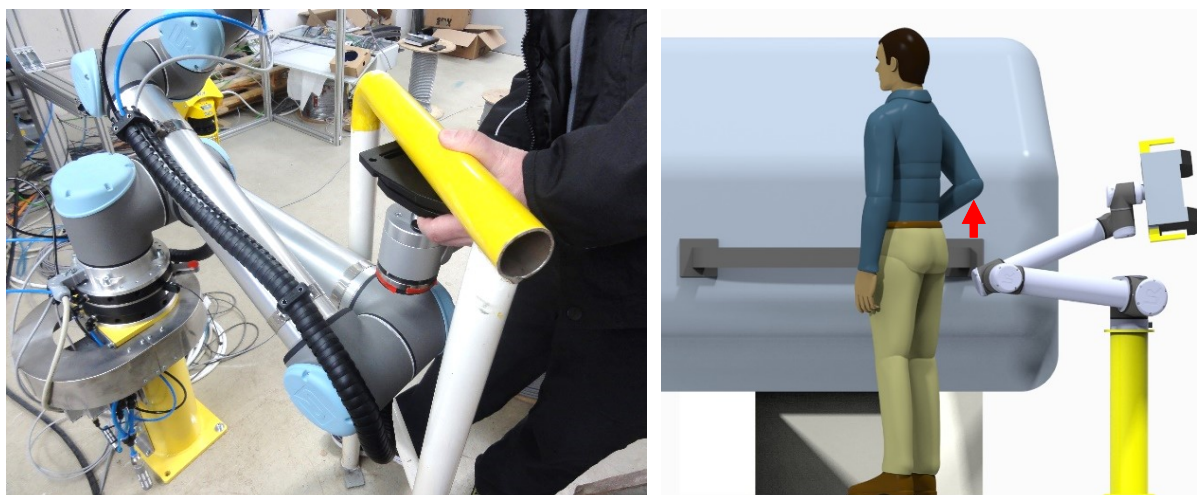
Při nárazu dochází k přetížení třetího kloubu robotu (lokte). Síla působí na dlouhém rameni na méně výkonném kloubu a k přetížení tak dojde při menším zatížení. K úplné eliminaci zatížení dochází po 0,25 s.



Obr. 62 Grafické vyjádření působení tlaku měření č.3 – 3D graf (vlevo), 2D graf (vpravo) v N/cm^2

Tlakové zatížení je rovnoměrné, bez výrazné špičky, protože robot naráží do snímacího zařízení válcovou plochou s průměrem 116 mm.

Čtvrtou analyzovanou situací je přesun robotu do vyčkávací polohy. Třetí rotační kloub robotu, tedy jeho loket se v tomto případě zvedá nahoru a může dojít k nárazu do lokte operátora, který se v té chvíli může nacházet otočený zády k pohybujícímu se robotu.

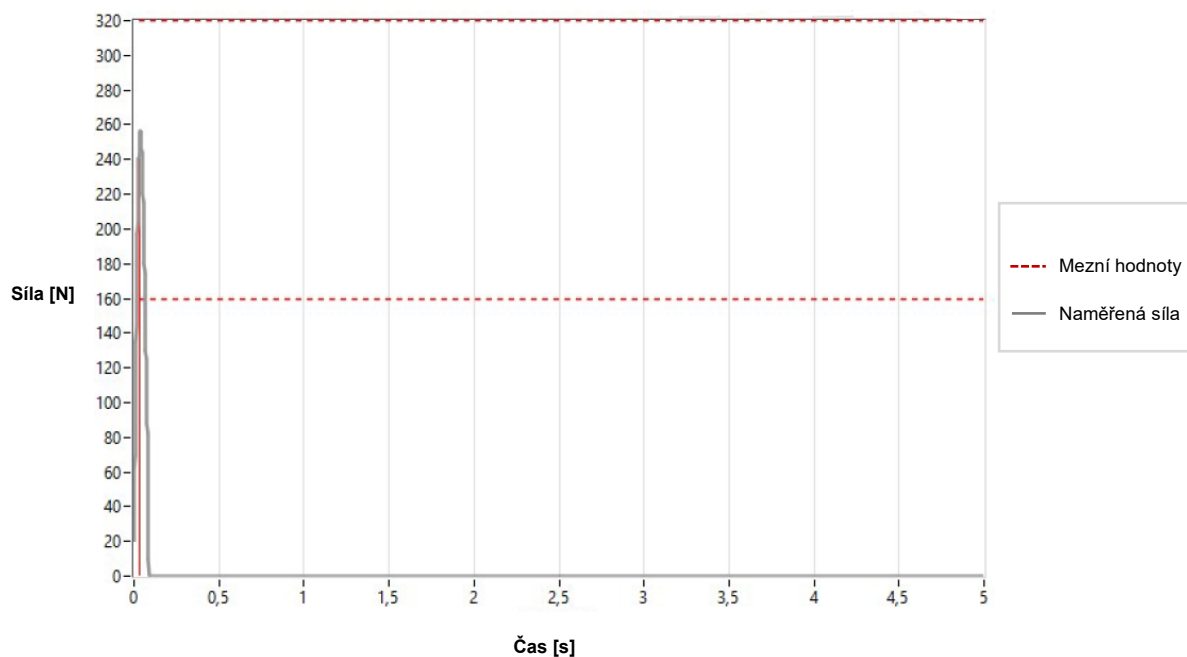


Obr. 63 Měření nárazu při zvedání lokte robotu

Tab. 10 Měření nárazové síly č.4

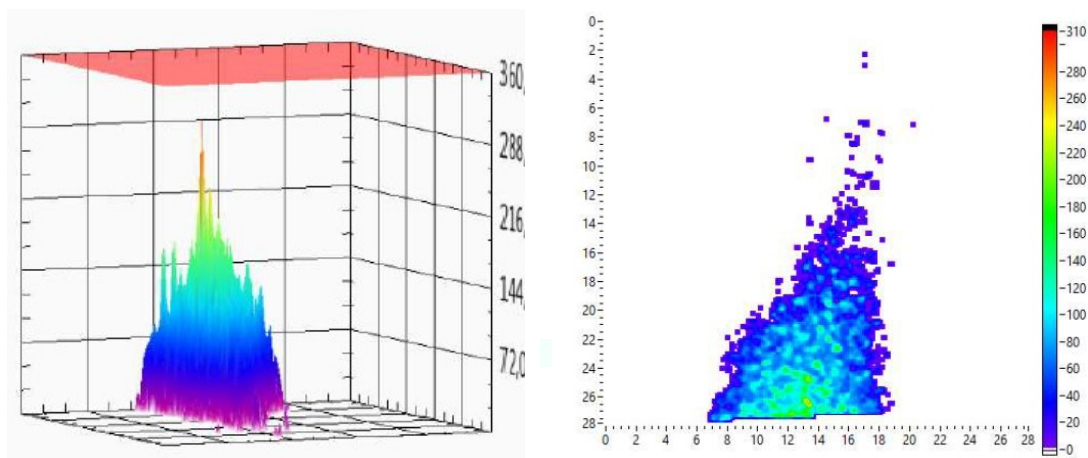
Oblast nárazu na těle člověka	Loket
Mezní hodnota nárazové síly – kvazistatický kontakt	160 N
Mezní hodnota nárazové síly – tranzientní kontakt	320 N
Mezní hodnota tlaku – kvazistatický kontakt	180 N/cm ²
Mezní hodnota tlaku – tranzientní kontakt	360 N/cm ²
Nastavená maximální rychlost koncového bodu robotu	40 °/s
Nastavená mezní síla robotu	100 N
Frekvence kontaktu	zřídka
Uvažovaný typ kontaktu	tranzientní
Naměřená síla	256 N
Naměřený tlak	301 N/cm²

Při měření č.4 zaznamenalo měřicí zařízení nejvyšší sílu o hodnotě 256N. Při tomto nárazu dochází k přetížení druhé osy manipulátoru, která má nejvyšší výkon. Naměřená hodnota je stále v přijatelném limitu tranzientního kontaktu. Případná kolize by nastala volně v prostoru a operátor by tak mohl paží pohnout ve směru pohybu robotu a minimalizovat tak nárazovou energii.



Obr. 64 Graf průběhu nárazové síly v měření č.4

Ke kolizi dochází při pohybu vzhůru. Robot zastaví ve velice krátkém časovém úseku a nedochází k prokmitu, ale k okamžitému uvolnění zatížení, z důvodu působení gravitační síly na rameno robotu.



Obr. 65 Grafické vyjádření působení tlaku měření č.4 – 3D graf (vlevo), 2D graf (vpravo) v N/cm^2

Měření tlaku v tomto případě nevykázalo relevantní výsledky. Hodnota $301 \text{ N}/\text{cm}^2$ je maximální hodnotou měřidla. Limitní hodnota pro tranzientní tlak je $360 \text{ N}/\text{cm}^2$, což je mimo rozsah měřidla. Z posouzení grafu vyplývá, že špičková hodnota vznikla bodově. Může se tak jednat o chybu skenování měřicí fólie nebo nečistotě.

6.8 Uvedení do provozu

Po proškolení obsluhy na nový systém bylo provedeno pozorování a následná konzultace s obsluhou ohledně ergonomie a složitosti ovládání. Identifikováno bylo několik problémů:

- **Prudké zastavování robotu** – v průběhu první fáze pracovního procesu, kdy robot manipuluje s dílem a obsluha musí být mimo sledovaný prostor, docházelo k zastavování pracoviště bez narušení prostoru pracovníkem. Odhaleny byly dva důvody tohoto problému. Ruční pistole lepičky, která musela být zachována pro jeden typ karoserie zasahovala svou hadicí do zorného pole skeneru a při pohybu vyvolala bezpečnostní zastavení. Tento nedostatek byl odstraněn změnou uchycení hadice. Druhým důvodem byla nesprávně nalepená čára vymezující pracovní sledovaný prostor skenerem a při blízkém průchodu obsluhy opět docházelo k bezpečnostnímu zastavení. Kalibrací skenované oblasti byl problém vyřešen.
- **Blízký průjezd kolem obsluhy** – obsluha z pravé strany při montáži byla omezena robotem, který se vrací do čekací polohy. Průjezd nebyl vyhodnocen jako nebezpečný, ale pohyb v blízkosti odváděl pozornost od montáže. Dráha odjezdu byla pozměněna bez ovlivnění délky pracovního taktu, a tím problém vyřešen.
- **Obtížné polohování do zakládací polohy** – v navrhovaném scénáři byl robot po napolohování nosníku za karoserii vozu přepnut do režimu ručního vedení a nasazení do finální polohy na přídržné háčky měla provést obsluha. Robot v režimu s rozvolněnými klouby ve vyložení za karoserií nesoucí díl nesplnil očekávání v jednoduchosti manipulace. Krok byl vyhodnocen jako komplikace a byla navržena změna. V novém postupu robot napolohuje díl za karoserii v mírném náklonu a čelisti efektoru jsou otevřeny. Obsluha díl vyjme a manuálně nasadí. Alternativním navrženým řešením bylo doplnění silového senzoru pro zjednodušení manipulace, ale z ekonomických důvodů nebylo toto řešení realizováno.

Pracoviště bylo ověřeno kapacitní zkouškou s návazností na dodržení požadovaného taktu 54s, to je kapacitní průchodnost linky 1200 karoserií za den při 85% využitelnosti zařízení. Předmětem kontroly byla montáž dvou typů karoserie ovlivněná novým pracovištěm:

- **Nanesení tmelu a montáž výstuhy pro typ A** – na 30 vyrobených kusech karoserie byl naměřen průměrný pracovní takt 53 s , tedy 98,2% požadovaného taktu.
- **Nasazení a montáž výstuhy pro typ B** – na 20 vyrobených kusech karoserie byl naměřen průměrný pracovní takt 46 s, tedy 85,2% požadovaného taktu

V obou případech byl požadovaný takt dodržen a pracoviště kapacitně vyhovuje.

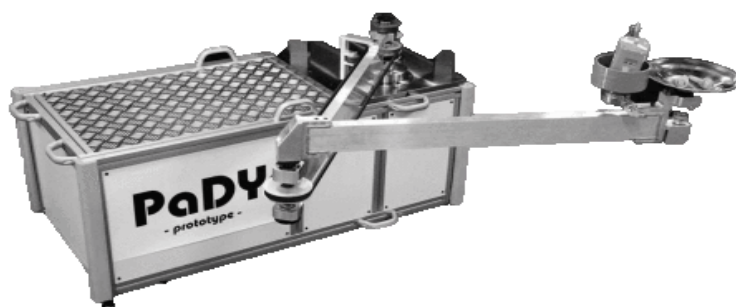
6.9 Kontrola bezpečnosti

V rámci předprovozního testování pilotní aplikace byla vytipována místa s vyšší pravděpodobností kolize a byly zde změřeny kolizní parametry. Tyto parametry byly následně porovnány s hodnotami vycházejícími z měření akceptovatelných kolizních sil, uvedenými v technické specifikaci ISO/TS 15066.

Pro komplexní ověření bezpečnosti v průběhu celého pracovního cyklu byla navržena metoda kontroly bezpečnosti pracoviště na základě přenosu energie dle ISO/TS 15066. Tato metoda byla navržena a testována nezávisle na pilotním pracovišti ve firmě Škoda Auto, kde už toto měření nebylo možné. Návrh metody a měření proběhlo v rámci individuálního výzkumného projektu na Tohoku University v Japonsku s použitím vybavení laboratoře oddělení robotiky.

6.9.1 Asistenční manipulátor PaDY

PaDY je anglickou zkratkou pro (**P**arts/**t**ools **D**elivery to **Y**ou robot). Jedná se o lehký manipulátor se dvěma stupni volnosti vyvinutý v laboratoři robotiky profesora Kosugeho. Manipulátor má dva rotační klouby, které mu umožňují pohyb v horizontální rovině. Manipulátor byl vyvinut pro nasazení na montážních linkách, kde může dodávat obsluze materiál a pracovní nástroje v celkové hmotnosti do 3 kg. Systém (Obr. 66) tvoří stabilní základna, která obsahuje řídicí elektroniku a pohonné jednotky ramene. Dvoučlankové lehké rameno je zkonstruováno z hliníkových profilů a krouticí moment je přenášen ozubeným řemenem. Na konci je umístěn box na součásti a nástroje, který může být upraven dle aktuální aplikace.



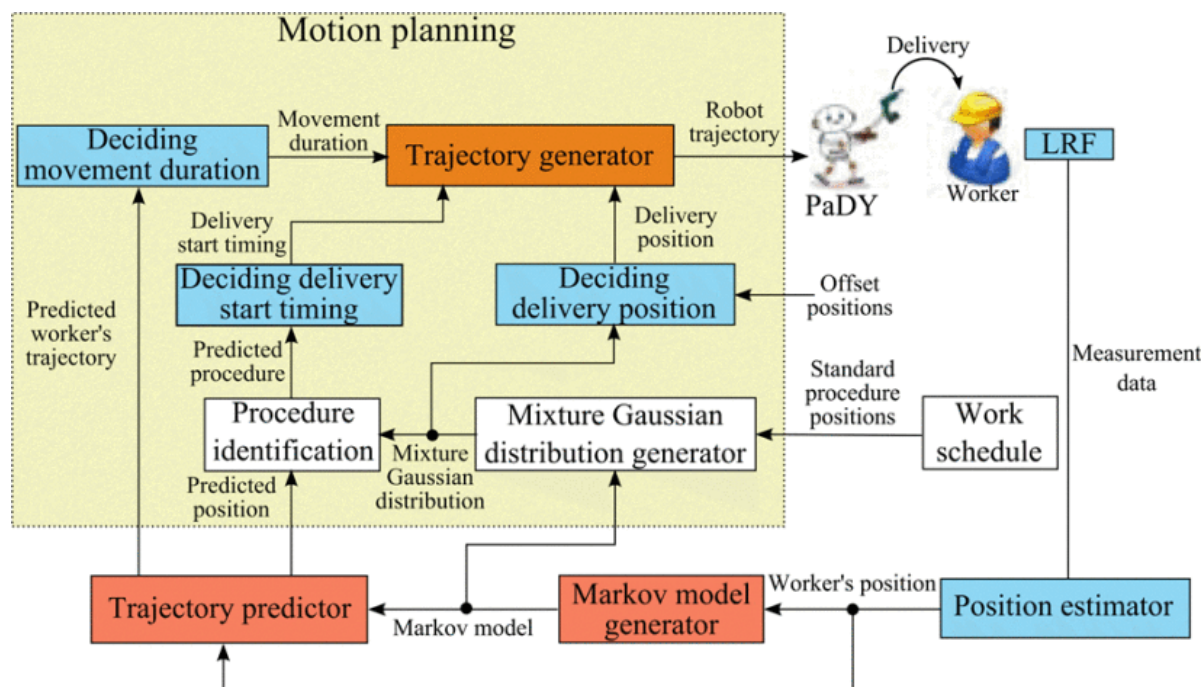
Obr. 66 Asistenční manipulátor PaDY

Součástí systému je laserový skener (LRF) HOKUYO UST-10LX pro detekci překážek v prostoru, a také pro detekci a sledování obsluhy pracoviště. Skener je umístěn do místa s nejlepším přehledem o pracovním prostoru a zkalibrován pro souřadný systém manipulátoru.

Tab. 11 Specifikace systému PaDY

Maximální dosah	2000 mm
Délka prvního článku	1068 mm
Délka druhého článku	932 mm
Hmotnost pohyblivého ramene	11,5 kg
Maximální nosnost	3 kg
Pracovní rovina manipulátoru od země	1050 mm
Rozsah detekce skeneru	0,06 – 10 m (max. 30 m)
Přesnost skeneru	±40 mm
Skenovací rovina od země	580 mm
Celkové rozměry (š x d x v)	587 mm x 1270 mm x 1044,5 mm

Hlavním úkolem manipulátoru je doručit díly a nástroje operátorovi v čase, kdy je potřebuje a na místo v dosahu ruky. PaDY se pohybuje na základě plánovače trajektorie, který byl vyvinut pro tento robot. Proces plánování trajektorie robotu je naznačen v převzatém diagramu.



Obr. 67 Řídící diagram robotu PaDY [51]

V předprovozní fázi, nebo také fázi učení, operátor provede několikrát pracovní cyklus bez asistence robotu – „Work schedule“ na obrázku Obr. 67. Pozice operátora jsou zaznamenány laserovým skenerem a následně vyhodnoceny. V místech, kde operátor zastaví svůj pohyb po definovanou dobu, jsou systémem navrženy odebírací pozice dílů. Tyto pozice mohou být ještě přizpůsobeny na základě ergonomie danému operátorovi – „Offset positions“. Zjištěné pozice s informací o času odebírání v průběhu cyklu jsou vstupními parametry pro predikci trajektorie operátora. Probabilistická metoda založená na Markovově modelu umožňuje předpovědět trajektorii operátora a systém následně navrhne bezkolizní trajektorii robotu. V optimálním scénáři operátor provádí montáž na pracovišti a robot dopraví díly v momentě, kdy operátor dorazí na montážní pozici, a přitom nijak neomezí operátora v pohybu.

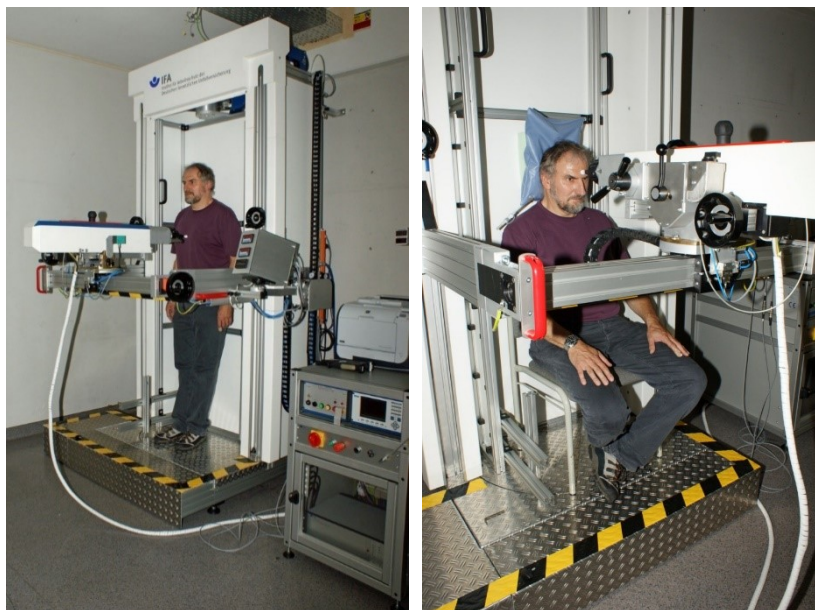
6.9.2 Metoda ověření bezpečnosti manipulátoru

V kapitole Předprovozní test systému 6.7 je popsána kontrola bezpečnosti ve vybraných situacích pracovního cyklu, kde jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami doporučenými v technické specifikaci ISO/TS 15066. V metodě uvedené v této kapitole je cílem ověření bezpečnosti v každém okamžiku pracovního cyklu. Výpočet je založen na stejném principu, jaký je uveden v technické specifikaci ISO/TS 15066, tedy že veškerá kinetická energie pohybujícího se robotu je pohlcena tělem operátora, který může být v klidu nebo v pohybu. Kolizní situace je popsána jako bezeztátová přeměna kinetické energie na energii pružiny dle rovnice (3).

$$\frac{1}{2} \mu v_{rel}^2 = \frac{F_{max}^2}{2k} \quad (3)$$

Součin redukované hmotnosti systému dvou relativně pohybujících se hmot μ a jejich relativní rychlosti v_{rel} na levé straně rovnice udává kinetickou energii, která je pohlcena částí těla operátora definovanou

maximální nárazovou silou F_{max} a konstantou pružiny k , které byly stanoveny experimentálně a jsou uvedeny v technické specifikaci ISO/TS 15066.



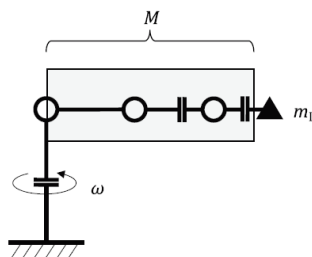
Obr. 68 Měření prahových hodnot bolesti při zatěžování definovaným tlakem

Experimentální měření přípustných nárazových sil proběhlo na německé univerzitě Johannes Gutenberg University v Mainz. Ve 29 oblastech na těle bylo provedeno asi 9000 měření na 100 testovacích subjektech [52]. Testovací zařízení má konec s definovanou čtvercovou plochou S se zaoblenými rohy v rozměrech 14x14 mm. V každém kroku je zvýšen tlak na testované místo v hodnotě 2-5N/S. Zaznamenáním hodnot působící síly, rozložení tlaku na působící ploše a hloubky průniku do testované části těla byla vytvořena tabulka, která je zahrnuta do technické specifikace ISO/TS 15066 jako příloha A.

$$\mu = \left(\frac{1}{m_R} + \frac{1}{m_H} \right)^{-1} \quad (4)$$

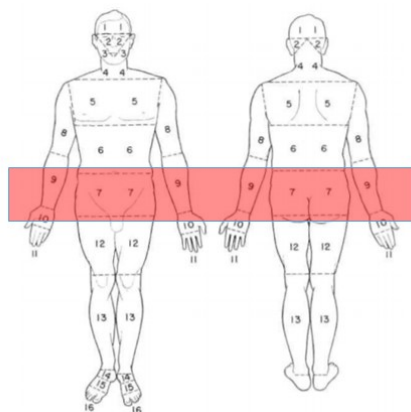
$$m_R = \frac{M}{2} + m_L = \frac{11,5}{2} + 3 = 8,75 \text{ kg} \quad (5)$$

Redukovaná hmotnost μ (4) je dána reciproční hodnotou součtu převrácených hodnot efektivní hmotnosti robotu m_R a efektivní hmotnosti části lidského těla, které přijde do kolize m_H . Efektivní hmotnost části lidského těla je uvedena v technické specifikaci ISO/TS 15066. Efektivní hmotnost robotu je dána součtu hmotnosti pohyblivé části robotu M , která je závislá na aktuální poloze robotu a jeho pohybu, a hmotnosti manipulované tímto robotem m_L dle rovnice (5). Výsledná efektivní hmotnost s maximálním nákladem při pohybu celého ramene je **8,75 kg**.



Obr. 69 Pohyblivá část robotu pro stanovení efektivní hmotnosti robotu

Kooperativní manipulátor PaDY se pohybuje v rovině ve výšce maximálně 1050 mm a minimálně 750 mm nad zemí. Tato analýza byla provedena v Japonsku, kde průměrná výška populace je 170,7 cm v případě mužů a 158 cm v případě žen[53]. Manipulátor se tak pohybuje v 44%-61,5% (47,5-66,5%) výšky těla. Na základě parametrů částí lidského těla byla stanovena kolizní oblast viz Obr. 70. V této zóně se nachází oblast břicha a pánve, a také předloktí a ruky.



Obr. 70 Kolizní oblasti na lidském těle[54]

Parametry vybraných oblastí lidského těla jsou shrnuty v tabulce Tab. 12. Po vyjádření maximální relativní rychlosti z rovnice (3) a dosazení příslušných hodnot je vypočtena tato rychlost pro vybrané části těla vyhodnocena kritická hodnota. Nejnižší maximální relativní rychlost je **410,5 mm/s** pro oblast břicha (6).

$$v_{rel,max} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu \cdot k}} = \frac{110 \text{ N} \cdot 1000}{\sqrt{\left(\frac{1}{8,75 \text{ kg}} + \frac{1}{40 \text{ kg}}\right)^{-1} \cdot 1000 \cdot 10 \text{ N/mm}}} = 410,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6)$$

Tab. 12 Parametry částí lidského těla a výsledná maximální relativní rychlost

Část těla	Maximální nárazová síla	Efektivní konstanta pružnosti	Efektivní hmotnost	Maximální relativní rychlost
Břicho	110 N	10 N/mm	40 kg	410,5 mm/s
Pánevní oblast	180 N	25 N/mm	40 kg	424,8 mm/s
Předloktí	160 N	40 N/mm	2 kg	627 mm/s
Ruka a prsty	140 N	75 N/mm	0,6 kg	682,2 mm/s

Při dodržení maximální relativní rychlosti vypočítané na základě hodnot z technické specifikace ISO/TS 15066 je energie nárazu v případě kolize v bezpečném rozsahu v rámci celého pracovního cyklu.

Metoda byla zjednodušena na předanou energii, z důvodu možnosti překročení maximálního tlakového zatížení (například v případě ostrých hran a výčnělků) by bylo vhodné tlak změřit v maximální rychlosti manipulátoru.

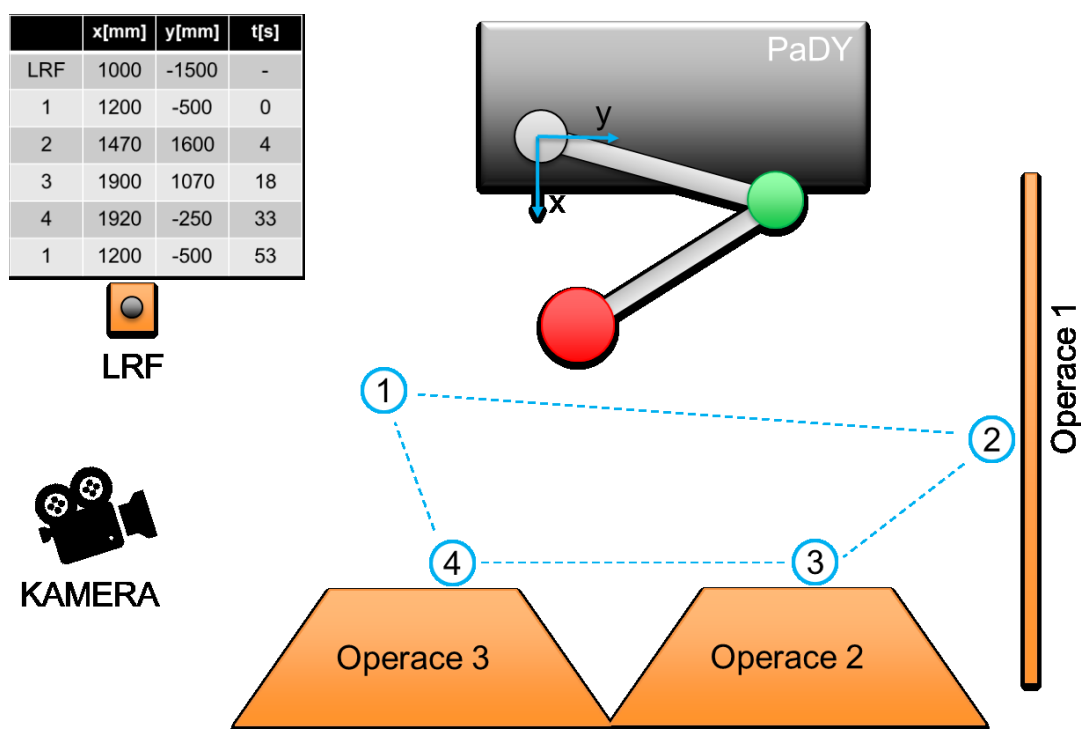
Metoda sledování a úpravy relativní rychlosti manipulátoru vůči obsluze byla ověřena na základě naměřených dat v experimentu a následně simulována v simulačním prostředí vytvořeném v MS EXCEL.

6.9.3 Experimentální ověření relativní rychlosti manipulátoru vůči obsluze

Vstupní data pro analýzu vycházejí z měření s aktuálním systémem PaDY. Na obrázku Obr. 71 je zobrazen půdorys testovacího prostředí s manipulátorem. Obsluha provádí 3 operace simulující pohyb a vykonávání montážních operací na montážní lince. Operátor se pohybuje mezi třemi pracovními pozicemi a jednou výchozí a konečnou, která byla pro zjednodušení sjednocena. Pracovní proces probíhá v následujících krocích:

- Operátor se přemísťuje z výchozí polohy **1** do pracovní pozice **2**, aby byl připraven vykonat úkon operace č.1
- Manipulátor doručí součástky operátorovi v čase, kdy operátor dorazí do pozice **2**
- Po převzetí součástek se manipulátor vrací do své domácí pozice
- Operátor dokončí prováděný úkon
- Operátor se přesouvá na další pracovní pozici **3**

Tento proces je iterativně opakován pro dokončení všech operací. Pozice operátora je sledována laserovým skenerem (LRF). Hodnoty ze skeneru udávané v polárních souřadnicích jsou převedeny do Kartézského systému souřadnic. Pozice jsou vztaženy ke globálnímu souřadnému systému umístěnému v ose první rotace manipulátoru. Pozice manipulátoru je vyhodnocena na základě dat z enkodérů jednotlivých kloubů.



Obr. 71 Experimentální pracoviště s manipulátorem PaDY a pracovní pozice

V tabulce na obrázku Obr. 71 je uvedena přesná pozice umístění laserového skeneru (LRF) a předpokládané montážní pozice operátora a časy, ve kterých se operátor v rámci pracovního cyklu na dané pozici nachází. Operace byly zvoleny následovně:

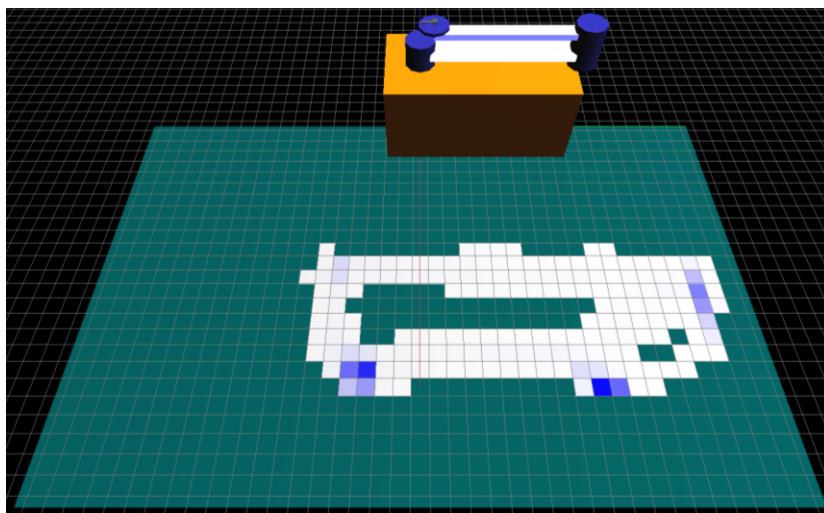
- Umístění magnetů na tabuli na vybrané pozice
- Sestavení jednoduchého šroubového spoje
- Montáž sestavy z hliníkových profilů

Tyto operace nejsou založeny na reálných úkolech, ale byly zvoleny z důvodu různé doby trvání a náročnosti. Pro každou operaci byly dopraveny manipulátorem odlišné součástky.



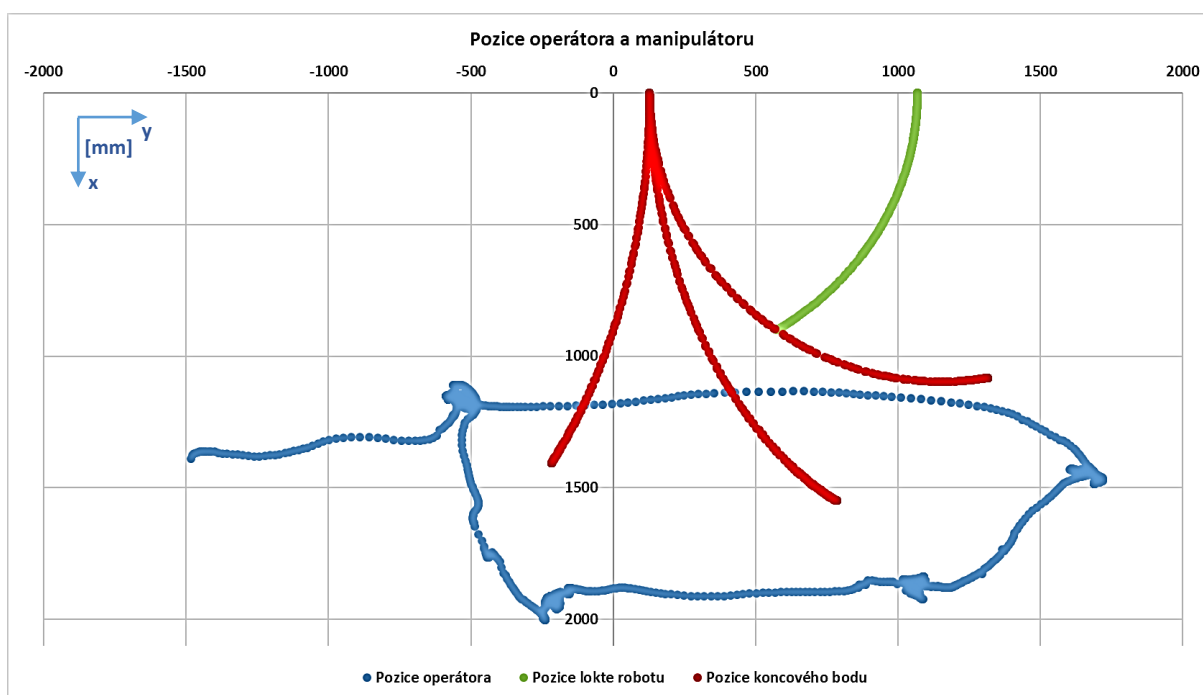
Obr. 72 Odběr součástek na pozici č.2

Operátor vykonal sérii deseti pracovních cyklů bez asistence manipulátoru, během kterých byla vytvořena mapa výskytu operátora, na základě které je následně manipulátor řízen (Obr. 73). Ve druhém kroku bylo provedeno měření za asistence manipulátoru.



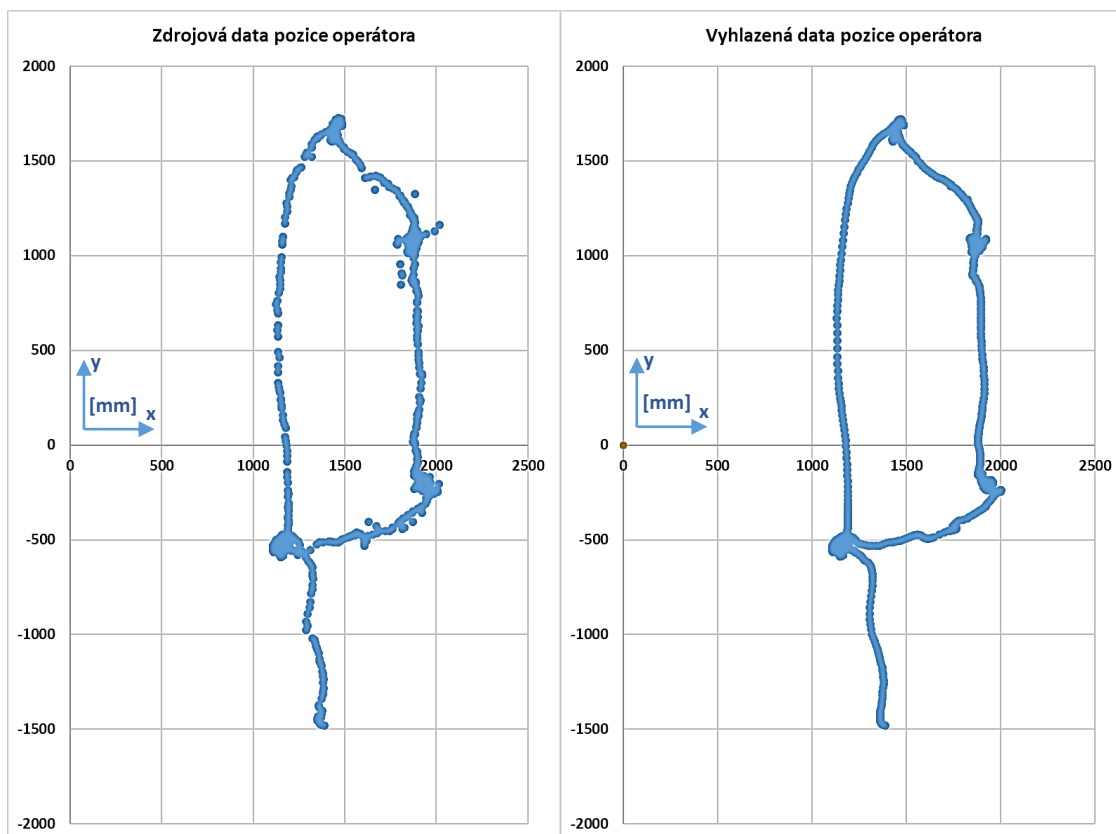
Obr. 73 Mapa výskytu operátora

Mapa znázorňuje výskyt operátora v pracovním prostředí a intenzita zabarvení délku setrvání na dané pozici. Prostor je rozdělen mřížkou o rozměru dlaždice 100x100 mm. Pravděpodobnost výskytu operátora v daném čase na dané pozici je využita k vytvoření bezkolizní trajektorie manipulátoru.



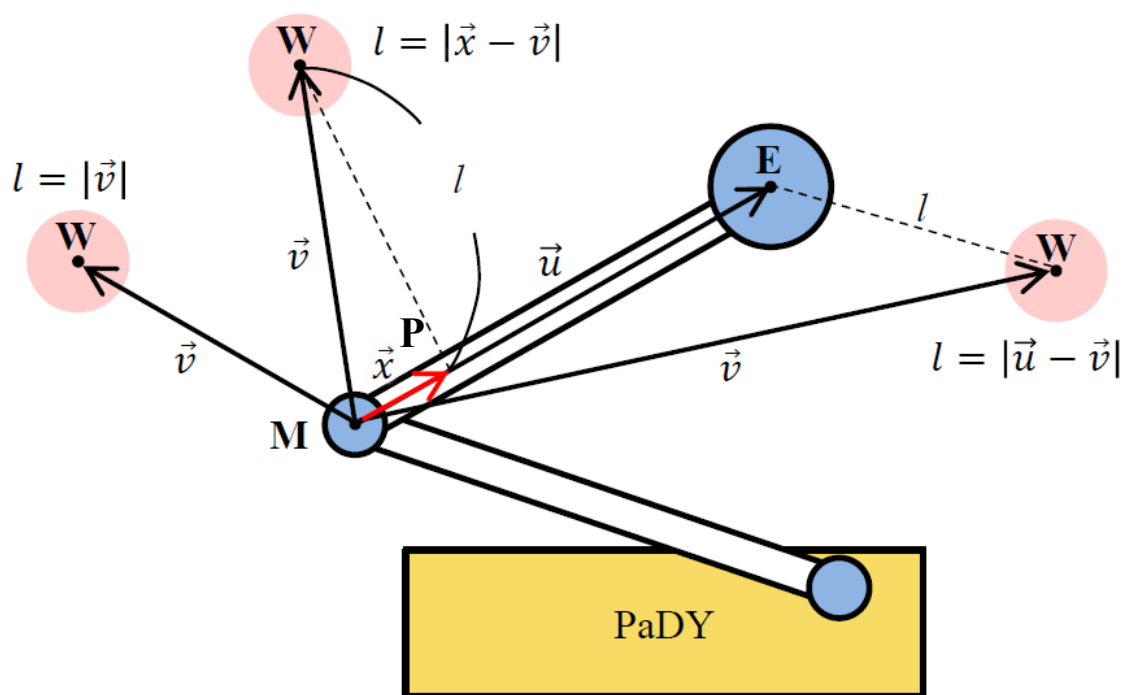
Obr. 74 Pozice obsluhy a manipulátoru v průběhu pracovního cyklu

Na obrázku Obr. 74 jsou vyobrazena naměřená data z jednoho pracovního cyklu. Červeně je vyznačen pohyb koncového bodu manipulátoru. Zelená barva udává pozici druhého rotačního kloubu robotu, tedy jeho lokte. Modrou barvu má pozice operátora. Data z laserového skeneru musí být zpracována a vyhlazena pro další analýzu. Z dat je odstraněna statická scéna a pozice pohybující se obsluhy je umístěna do těžiště odrazu detekované překážky. Data jsou vyhlazena klouzavým průměrem 9 hodnot, aby nedocházelo ke skokovým změnám polohy (Obr. 75).



Obr. 75 Vyhlazení dat pozice operátora

Relativní rychlost manipulátoru vůči operátorovi je vypočítána jako změna nejkratší vzdálenosti mezi těmito dvěma subjekty v čase. V průběhu experimentu se obsluha nepohybovala v dosahu prvního ramene robotu, může tak dojít ke kolizi pouze s článkem druhým. Pro zjednodušení analýzy na dostupná data je metoda omezena na kontrolu kolize s druhým článkem robotu.



Obr. 76 Nejkratší vzdálenost operátora W od druhého článku manipulátoru

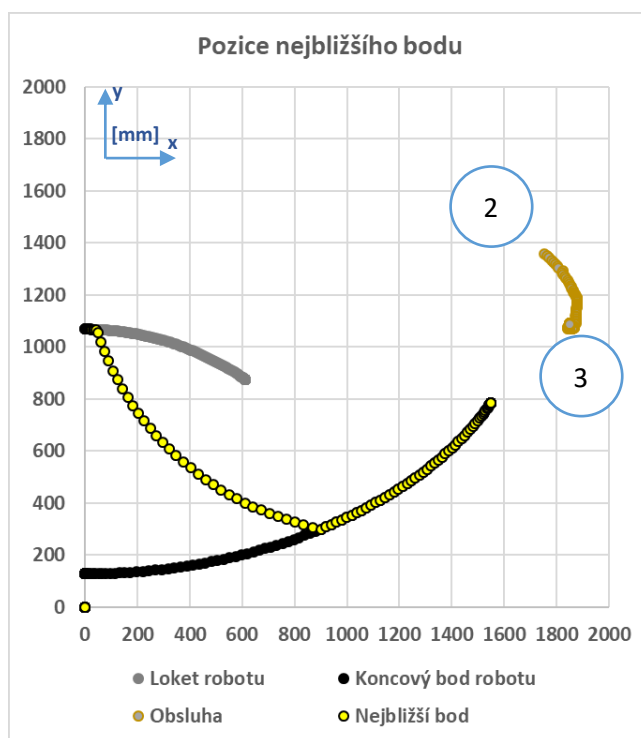
Na obrázku Obr. 76 jsou znázorněny možné pozice operátora vzhledem k natočení ramene manipulátoru. Na manipulátoru je znázorněn bod M – druhý kloub robotu a zároveň jeho loket. Bod E je koncový bod manipulátoru. Mezi těmito body je druhý článek robotu označený vektorem \vec{u} . Vektor \vec{v} směřuje z bodu M do bodu W udávajícího pozici operátora. Nejkratší vzdálenost l je počítána třemi způsoby podle aktuální pozice operátora:

- Nejkratší vzdálenost je od lokte robotu M
- Nejkratší vzdálenost je kolmá k rameni robotu
- Nejkratší vzdálenost je od koncového bodu E

V případech 1 a 3 je nejkratší vzdálenost počítána jako vzdálenost dvou bodů, v případě 2, tedy nejkratší vzdálenost je kolmá k rameni robotu je nejprve nalezena pata kolmice P (7) a následně opět vypočtena vzdálenost dvou bodů l .

$$P = M + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}|^2} \cdot \vec{u} \quad (7)$$

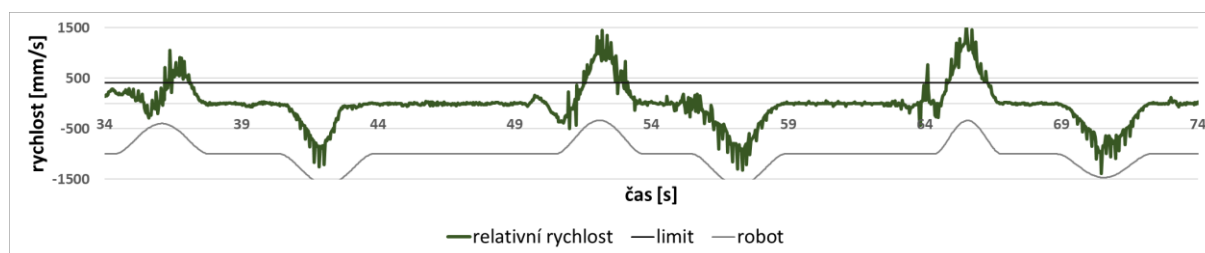
Pozice nejbližšího bodu manipulátoru od operátora se v průběhu pohybu mění. Na obrázku Obr. 76 je část pracovního cyklu, konkrétně pohyb z pozice číslo 2 do pozice číslo 3. Žlutou barvou vyznačen nejbližší bod manipulátoru. Bod se v průběhu pohybu manipulátoru přesouvá z lokte po rameni manipulátoru až do koncového bodu, kde tento bod setrvává v druhé polovině pohybu. Hnědou barvou je vyznačena dráha pohybu operátora.



Obr. 77 Pozice nejbližšího bodu manipulátoru od operátora

V grafu průběhu relativní rychlosti (Obr. 78) je zelenou barvou vyobrazena relativní rychlost manipulátoru vzhledem k obsluze. Černá linie je limitní hodnota vypočítaná v předchozí kapitole. Pro

ilustraci je do grafu vložen průběh rychlosti kloubů robotu, který není v měřítku grafu, ale informuje, ve které fázi pracovního procesu se robot pohybuje a kdy je v klidu.

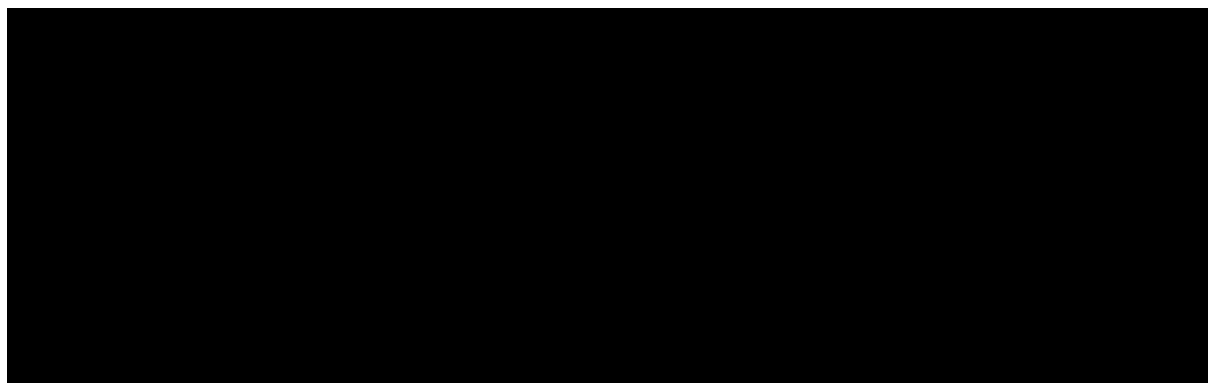


Obr. 78 Průběh relativní rychlosti v pracovním cyklu

6.9.4 Simulační prostředí pro změnu parametrů pohybu manipulátoru

Analýzou relativní rychlosti za stávajících provozních parametrů bylo zjištěno, že v kritických momentech je limitní rychlost překročena o 200%. Pro testování různých parametrů pohybu bylo vytvořeno simulační prostředí v MS EXCEL. Vstupní data pro analýzu jsou pozice operátora na pracovišti. Tato data jsou časově synchronizována s naměřeným natočením manipulátoru dle enkodérů v jeho kloubech.

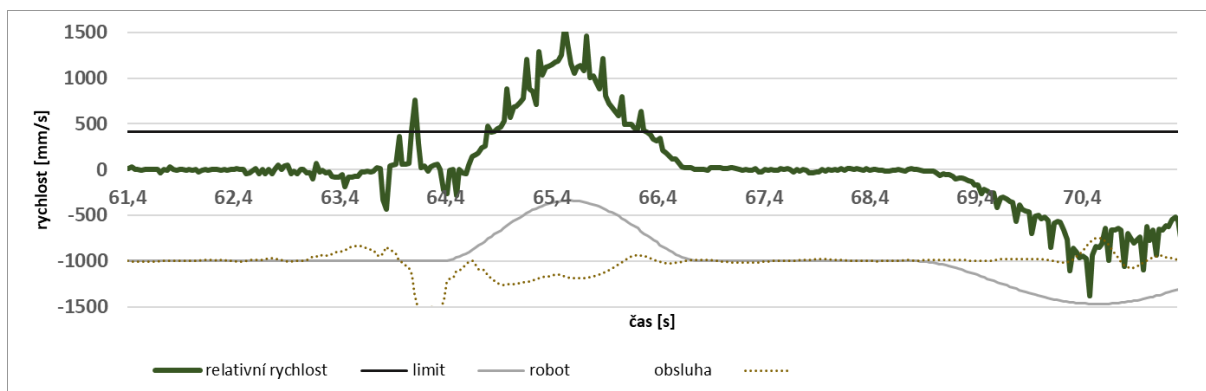
Simulační program generuje novou trajektorii manipulátoru dle nastavených parametrů a následně synchronizuje pohyb s naměřenými daty pozice operátora. Prvním krokem je změna původního průběhu trajektorie robotu. V původním návrhu má průběh rychlosti tvar polynomu čtvrtého stupně. Polynomický průběh byl zvolen pro jeho plynulost, problémem je kontrola maximální rychlosti. Doba pohybu je nastavena na maximálně 3,5s, robot tedy začíná svůj pohyb 3,5s před cílovým časem. Tento způsob časování trajektorie byl nahrazen lichoběžníkovou funkcí s dobou pohybu 3s a 0,5s na zrychlení a brzdění.



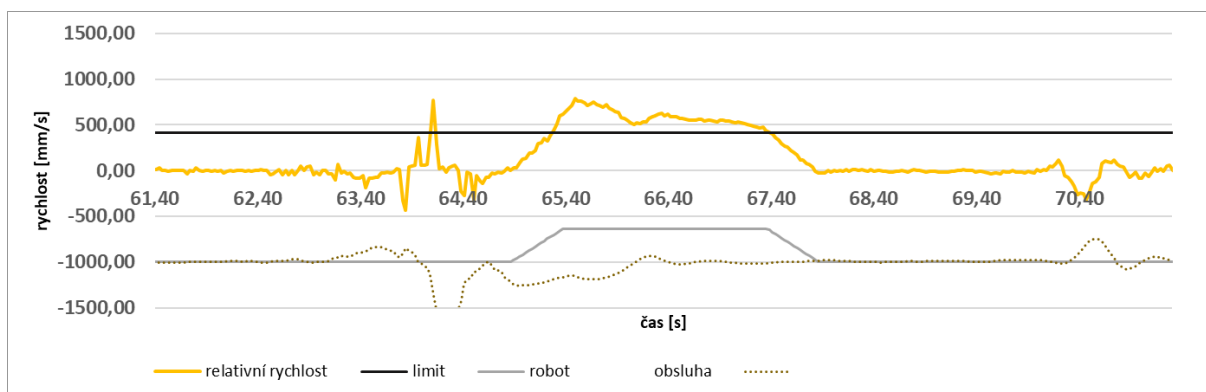
Obr. 79 Změna profilu rychlosti

Na obrázku Obr. 81 je vyobrazen původní polynomický průběh, kde dochází k překročení limitní rychlosti o více než 200%. Po změně profilu rychlosti na obrázku Obr. 82 je limit překročen o asi 80%. V grafech relativní rychlosti jsou uvedeny průběhy pohybu robotu a rychlosti operátora, které nejsou v měřítku grafu a slouží pouze pro informaci o stavech dílčích složek výsledné relativní rychlosti.

Obr. 80 Simulační prostředí pro nastavení časování trajektorie robotu v MS EXCEL



Obr. 81 Relativní rychlost s polynomičným průběhem rychlosti robotu



Obr. 82 Relativní rychlost s lichoběžníkovým průběhem rychlosti robotu

Metoda pro splnění bezpečnostních limitů spočívá ve snížení celkové relativní rychlosti mezi operátorem a robotem. Výpočet nové rychlosti probíhá ve dvou krocích:

- Simulace s konstantním parametrem doby pohybu
- Snížení maximální rychlosti dle limitní hodnoty

Relativní rychlost je složena z rychlosti operátora, která není ovlivnitelná a rychlosti robotu, která může být snížena (8). Snížení rychlosti je provedeno poměrem k (9), který je vypočítán z maximální špičkové hodnoty $v_{rel,max}$, která je nalezena v simulovaném průběhu, limitní hodnoty $v_{rel,lim}$ a aktuální rychlosti robotu v kritickém okamžiku v_{robot} (10), spojením rovnic (8) a (9).

$$\vec{v}_{rel,max} = \vec{v}_{robot} - \vec{v}_{operátor} \quad (8)$$

$$\vec{v}_{rel,lim} = k \cdot \vec{v}_{robot} - \vec{v}_{operátor}, \text{ kde: } k = \frac{\vec{v}_{původní}}{\vec{v}_{snížená}} \quad (9)$$

Rychlost nejbližšího bodu manipulátoru v_{robot} je závislá na rychlostech kloubů manipulátoru ω_{robot} přes Jacobián J ve tvaru $\vec{v} = J\omega$ v čase maximální relativní rychlosti (kritickém okamžiku).

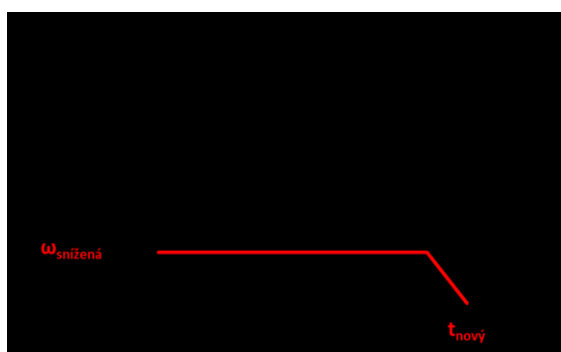
$$k = \frac{J \cdot \omega_{robot} + \vec{v}_{rel,lim} - \vec{v}_{rel,max}}{J \cdot \omega_{robot}} \quad (10)$$

Jacobián manipulátoru se dvěma stupni volnosti je závislý na aktuálním natočení manipulátoru q_1 a q_2 a jeho efektivních délkách, tedy délce prvního ramene l_1 , a vzdálenosti nejbližšího bodu manipulátoru od obsluhy na druhém rameni, od lokte robotu l_2 .

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \cdot \sin(q_1) - l_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cdot \cos(q_1) + l_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

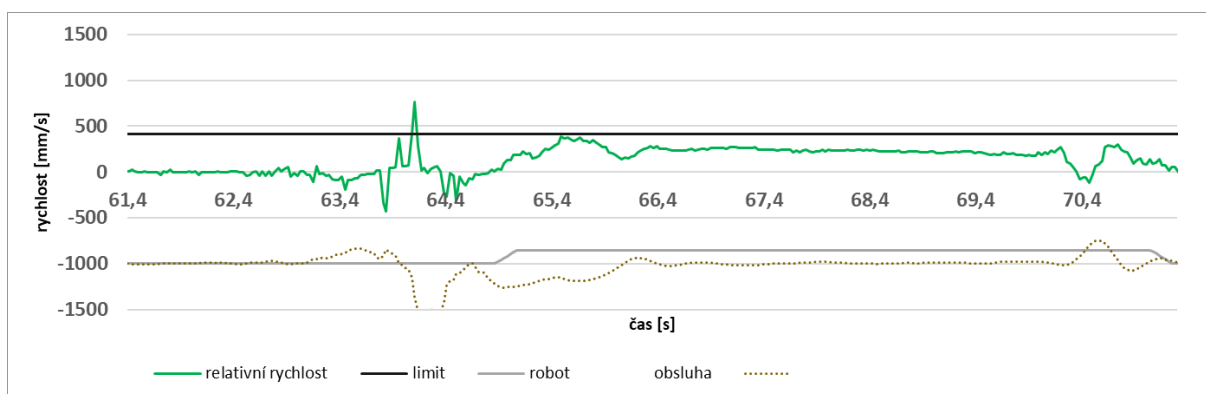
Pro dodržení vazeb pohybu, tedy aby po snížení rychlosti byla dodržena konstantní dráha, musí být přepočítána doba pohybu manipulátoru. Hodnota zrychlení zůstává konstantní.

$$t_{\text{nový}} = \frac{(t_{\text{původní}} - t_{\text{zrychlení}})}{k + (k \cdot t_{\text{zrychlení}})} \quad (12)$$



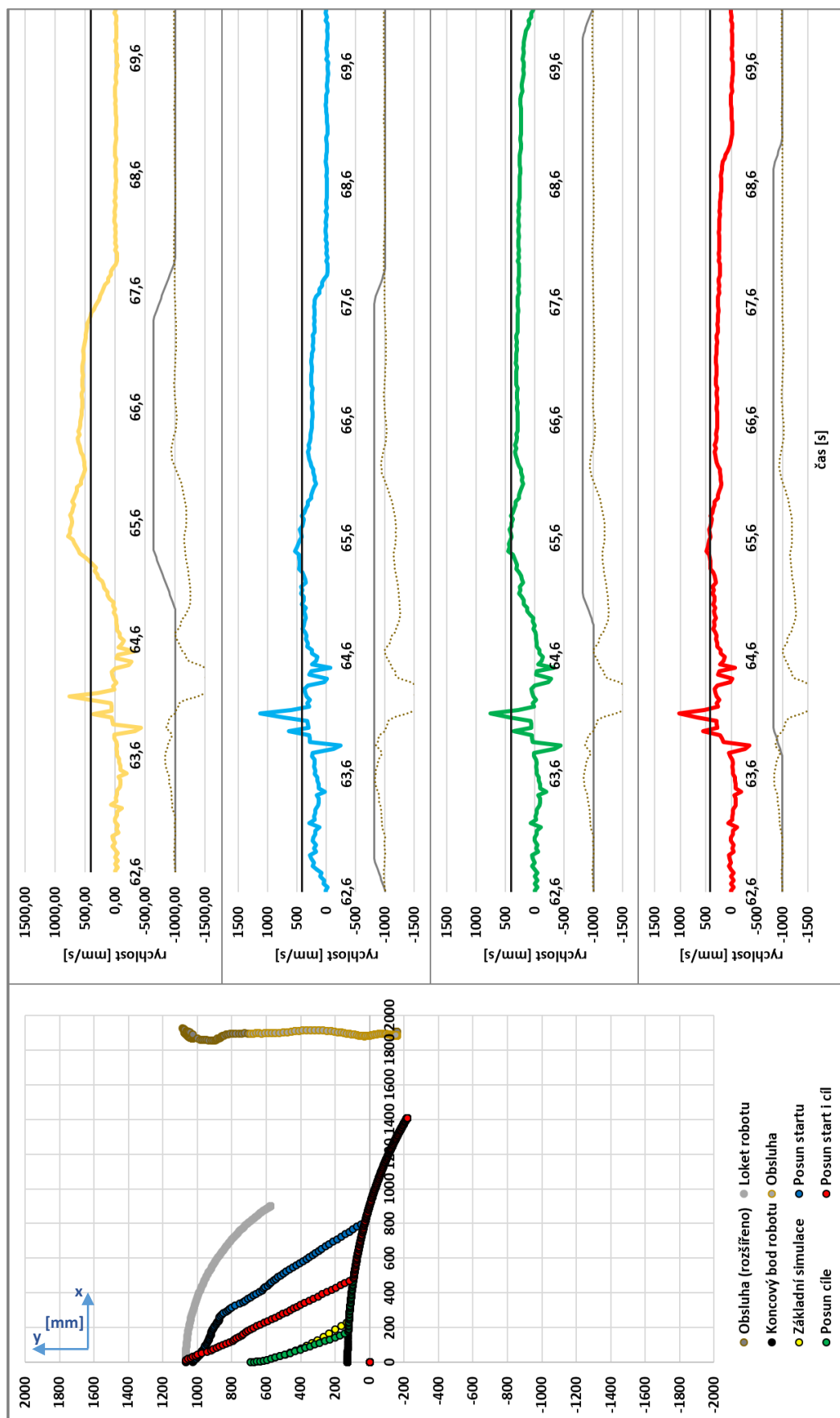
Obr. 83 Snížení rychlosti pohybu

Snížením rychlosti poměrem k je výsledná relativní rychlost ve stanoveném limitu při pohybu robotu. V grafu (Obr. 84) je vidět špička překračující limit, ale vzniká v důsledku pohybu obsluhy při klidovém stavu manipulátoru. Doba pohybu byla navýšena ze 3 s na 6,39 s. Obsluha musí 3,39s čekat, než jsou doručeny díly.



Obr. 84 Snížená rychlost dle poměru k

Nevýhodou metody je malá robustnost vůči kritickým pohybům operátora vzhledem k robotu. Při rychlém pohybu směrem proti pohybujícímu se robotu dochází ke vzniku špičky relativní rychlosti a v následném vyhodnocení maximální rychlosti je nastaven přísný limit. To vede k neefektivnímu časování robotu, který může vykonávat svůj pohyb mnohonásobně déle.



Obr. 85 Srovnání posunutých průběhů relativní rychlosti obsluhy a manipulátoru

Další experimenty proběhly s posunem startovacího času pohybu namísto času cílového uvedeného výše, a také případ rovnoměrného prodloužení pohybu před startovní a po cílovém času z původní analýzy. Srovnání v grafu (Obr. 85) zobrazuje výsledky jednotlivých simulací. Žlutá čára je výslednicí simulace s definovanou délkou 3 s, v grafu je vidět překročení limitní hodnoty po většinu doby pohybu robotu. Zelený průběh je výsledkem snížení relativní rychlosti navrhovanou metodou a prodloužením doby pohybu robotu. Výsledkem je průběh pod limitní hodnotou. Navýšením doby je čekací doba operátora 3,6 s. Pro snížení čekací doby operátora byl navržen posun startovního času a zachování času cílového. Tento průběh je znázorněn modrou barvou. Pohyb robotu výrazně zasahuje do oblasti, kde se do cílové pozice pohybuje operátor a výsledná relativní rychlost je tímto pohybem ovlivněna.

7 Závěry

V úvodu práce je provedena analýza současného stavu technologií a principů spolupráce robotu s člověkem. Jako hlavní důvody nasazení byly identifikovány: omezený zástavbový prostor pro plánované pracoviště, zlepšení ergonomie výrobního procesu, častá změna trajektorie robotu, zvýšení kvality výrobků nebo odstranění monotónních operací vykonávaných operátorem. Tyto důvody byly popsány na příkladech pracovišť, které již byly realizovány. Průzkumem technologií zabezpečení pracoviště a principů detekce kolize byl vytvořen přehled aktuálních možností vytváření bezpečných pracovišť splňujících průmyslové standardy a normativní požadavky. Zároveň byla provedena rešerše průmyslových robotů určených ke spolupráci robotu s člověkem. Shrnutí parametrů je uvedeno v: Příloha č.2 – Přehled parametrů cobotů.

V kapitole č.4 byla provedena analýza norem, které jsou spojeny s problematikou práce a definice základních pojmů. Jedná se o normy ČSN EN ISO 10218, které definují požadavky na návrh robotů a robotizovaných pracovišť. Tyto normy definují také základní pojmy a způsoby spolupráce. Speciálně coboty se zabývá technická specifikace ISO TS 15066. Na základě této normy byla definována bezpečnostní kritéria pro návrh pracoviště. V kapitole je dále analyzován soubor norem zabývajících se analýzou možných rizik a způsoby nakládání s riziky. V této analýze jsou zkombinovány poznatky z norem, doporučení firem zabývajících se zabezpečením pracovišť a zkušenosti z návrhů systémů s coboty do výsledného procesu posouzení rizik. Výsledky analýzy a návrhy dalšího postupu jsem publikoval, a také představil na National Robot Safety Conference 2017 v Pittsburghu.

Vytvoření metodiky návrhu pracovišť stanovené ve druhém z cílů práce je provedeno v kapitole č.5. Metodika je rozdělena do šesti etap návrhu, které jsou paralelně doprovázeny analýzou rizik. První etapou je výběr vhodného pracoviště na základě specifických požadavků identifikovaných v analytické části práce. V kapitole jsou uvedena obecná doporučení pro analýzu vybraného pracoviště a metody kontroly bezpečnosti navrženého pracoviště. Druhou etapou je zhodnocení navrhovaného pracoviště, kde je analyzována činnost obsluhy, pracovní prostor a objekt manipulace nebo zvolená technologie. Na základě této analýzy je proveden návrh pracoviště a výběr komponent. Během tohoto kroku je vybrán vhodný robot a další periferní zařízení, vytvořen bezpečnostní koncept a vytvořen proces výroby s rozdělením operací mezi obsluhu a robot. Správný návrh bezpečnostního konceptu je ověřen v předprovozním testu systému. V tomto testu je změřen doběhový čas robotu při narušení hlídání zóny obsluhou, na jehož základě mohou být zkontrolovány a případně korigovány sledované zóny. Druhým testem je měření nárazových sil při vybraných kolizních situacích. Dle navržených podmínek jsou identifikovány situace, kdy může dojít ke kritické kolizi robotu s obsluhou. V těchto situacích je měřena síla nárazu a tlak na sledovanou plochu. Výsledky měření jsou porovnány s doporučenými bezpečnými hodnotami uvedenými v ISO TS 15066. V etapě uvedení do provozu jsou ověřeny bezpečnostní, ergonomické a provozní parametry přímo ve výrobním procesu. Z důvodu přítomnosti obsluhy a z toho vyplývající neurčitosti délky výrobního cyklu je do tohoto bodu zařazena také kapacitní zkouška pracoviště. Poslední etapou je kontrola bezpečnosti v rámci celého pracovního cyklu.

Navržená metodika byla použita při návrhu pilotního pracoviště ve firmě ŠKODA AUTO a.s.. Díky otevřenému zadání a možnosti volby výběru pracoviště mohly být aplikovány všechny etapy návrhu stanovené v metodice až na poslední bod kontroly bezpečnosti, která byla provedena v doplňkové studii. Cílová oblast nasazení aplikace, tedy svařovna karoserie automobilu, byla důkladně prozkoumána a byla vybrána dvě pracoviště s největším potenciálem nasazení kolaborativního robotu. Detailnějším porovnáním přínosu pracoviště a větším rozsahem použitých principů spolupráce robotu s člověkem, a tím i větším potenciálem demonstrace a ověření navržených metod bylo vybráno pracoviště montáže nosníku zadního nárazníku.

Na pracovišti byly vyhodnoceny operace prováděné obsluhou a tři vykazovaly potenciál pro robotizaci. Při převzetí manipulace s dílem o hmotnosti necelých 5 kilogramů robotem byla zlepšena ergonomie pracoviště snížením zátěže na ruce a záda obsluhy. Proces nanášení tmelu byl stabilizován a kvalita těsněného spoje se zvýšila. Poslední operací vybranou k robotizaci je přidržení nestabilního dílu v montážní poloze, což optimalizovalo montážní proces a zkrátilo dobu montáže tohoto dílu. Analýzou prostoru a z toho vyplývajících potřebného dosahu robotu a analýzou manipulovaného dílu byl vybrán robot UR10 od firmy Universal Robots. Koncový efektor byl navržen s ohledem na konstrukční požadavky na zařízení pracující ve sdíleném pracovním prostoru. Snahou byla demonstrace všech čtyř principů spolupráce robotu s člověkem. V první fázi pracovního procesu, kdy robot manipuluje s dílem a nanáší těsnicí tmel, bylo vyhodnoceno, že obsluha se nesmí nacházet v pracovním prostoru robotu. Robot je tak v režimu monitorování rychlosti a polohy, a v případě detekce přítomnosti obsluhy v hlídaném prostoru je pohyb robotu zastaven. Následně robot čeká v režimu monitorovaného zastavení na příchod obsluhy na montážní pozici. Plánované nasazení dílu v režimu navádění robotu bylo zjednodušeno na manuální založení dílu obsluhou z důvodu obtížného ovládnutí robotu v jeho větším vyložení. Po odebrání dílu odjíždí robot v režimu omezeného výkonu během montáže dílu obsluhou.

V předprovozním testu bylo za asistence firmy Sick provedeno měření doběhového času, které potvrdilo správné nastavení sledovaných zón. Měření nárazových sil proběhlo ve čtyřech kritických situacích, kde byla vyhodnocena vyšší pravděpodobnost kolize robotu s obsluhou. Všechna měření došla k závěru, že při kontaktu nedojde k nebezpečnému ohrožení obsluhy. Pracoviště bylo zprovozněno na výrobní lince a během prvního týdne provozu optimalizováno na základě připomínek obsluhy. Došlo k drobným úpravám trajektorie pohybu robotu a seřízení bezpečnostních zařízení. Od zprovoznění v srpnu 2018 je pracoviště ve třísměnném provozu stále provozováno (květen 2019).

V metodice byla jako poslední fáze navržena kontrola bezpečnosti pohybu robotu v průběhu celého pracovního cyklu. Toto téma bylo řešeno v doplňkové studii prováděné během stáže na Tohoku University v Japonsku v laboratoři prof. Kosugeho a asistenta Kinugawy. Na robotickém manipulátoru se dvěma stupni volnosti byla provedena analýza energie nárazu na základě relativní rychlosti operátora a robotu a příslušných dynamických charakteristik. Bylo zjištěno, že bez přizpůsobení pohybu robotu aktuálnímu pohybu operátora je bezpečná energie nárazu překročena o více než 200%. Dle ISO TS 15066 byla navržena metoda ověření bezpečné rychlosti manipulátoru a následná korekce kinematických parametrů pro dodržení bezpečných limitů. Metoda je založena na omezení rychlosti manipulátoru. To se ukázalo v některých případech jako neefektivní a byly porovnány různé postupy synchronizace časování pohybu robotu s pohybem operátora. Výsledky analýzy budou také publikovány v již přijatém konferenčním článku na konferenci AIM 2019 v Hong Kongu. V tomto příspěvku jsou diskutovány další vlastnosti navržené metody.

Za vědecký přínos této práce považuji definování postupů vedoucích k ověření bezpečnosti pracovišť se spolupracujícími roboty, na základě kterých byla vytvořena metodika jejich návrhu. Metodika byla úspěšně aplikována a její správnost ověřena na pilotním pracovišti dokončeném v roce 2018 v průběhu mé stáže ve firmě ŠKODA AUTO a.s.

8 Doporučení pro další výzkum

Návrh pracovišť se spolupracujícími roboty je stále nové téma s minimem referenčních pracovišť, které byly realizovány v nelaboratorních podmínkách. Poznatky z analýzy dostupných technologií, realizovaných pracovišť a realizace pilotního pracoviště vygenerovaly témata pro další výzkum.

Oblast spolupracujících robotů je stále rozvíjející se oblast s omezenými možnostmi, které zvýhodňují standardní robotizaci bez přítomnosti obsluhy. Oblasti následného výzkumu by měly být zaměřeny na efektivní detekci obsluhy v pracovním prostoru robotu a následnou identifikaci možnosti kolize a reakce na tuto situaci. Druhou oblastí je interakce obsluhy s pracovištěm. Touto problematikou se zabývá publikace autora práce „Interaction with collaborative robot using 2D and TOF camera“ a bude dále rozvíjena.

Metodiku návrhu je potřeba aplikovat na návrhu více pracovišť a odhalit tak její slabé stránky a specifikovat další detaily. Závěrečná kontrola bezpečnosti byla ověřena na jednoduchém manipulátoru a je zde prostor pro zobecnění postupu. Metoda snížení rychlosti robotu není dostatečně robustní a řešením by mohla být změna trajektorie pohybu na základě potenciálového pole závislého na relativní rychlosti zjištěné v navrhované metodě.

9 Conclusions

The introduction of the thesis covers the analysis of the current state of technologies and basic principles of human-robot cooperation. Principal applicational reasons were identified as follows: a limited working area for the planned workplace, improvement of working process ergonomics, frequent change of the robot's trajectory, quality improvement of the product or reduction of monotonous movements of the operator. Those reasons were described and demonstrated on the reference workplaces which were built in several companies. The research of safety devices for robotic cells and principles of collision detection gives an overview of current possibilities in the design of safe robotic workplaces which meet industrial standards and legislative requirements. There is a table of parameters of industrial robots made for human robot collaboration in the appendix. This table is based on the research of available collaborative robots in the market.

The chapter 4 deals with an analysis of technical standards which are important for the robotic workplace design and the definition of general concepts. The technical standards ČSN EN ISO 10218 define requirements for industrial robots and robotic workstations. These technical standards also define basic concepts and modes of human-robot cooperation. The technical specification ISO TS 15066 is focused directly to cobots and safety criteria for the workplace design were settled based on this standard. The chapter 4 includes the analysis of a set of technical standards dealing with risk assessment and risk management. In this analysis the knowledge from technical standards is combined with the experience and recommendations from specialists from safety devices companies and the experience from the pilot project development into a risk assessment methodology. Results of this analysis were published and I presented this topic at the National Robot Safety Conference 2017 in Pittsburgh.

The robotic workplace design methodology proposal which is suggested as the goal of this thesis is formed in the chapter 5. The methodology is divided into 6 parts which are accompanied in parallel with the risk analysis. In the first section the appropriate application is selected based on specific requirements which were identified in the analytical part. There are general recommendations for the workplace selection and methods for safety verification. In the second section the chosen workplace is evaluated. In this part there is analysed the operator's activity, working environment and the object of manipulation or the technology mounted to the robot. Based on the previous step the design of the

workplace is done including the proper component selection. An appropriate robot is chosen in this section with the peripheral devices and the overall safety concept is developed. The operation process is described, and operations are divided between the operator and the robot. The correctness of the safety concept is verified in the pre-production testing. During this test the stopping time of the robot is measured in the case of a workspace intrusion. This measurement gives us an information for inspection and correction of prescribed safety zones. The second test is an impact force measurement. According to the proposed conditions, situations with a higher probability of collision are discovered. In such a situation the impact force of the robot with the operator is measured and the pressure on the observed surface is found. Results of the measurement are compared with recommended safety limits referred to in ISO TS 15066. In the section of the production kick-off the following parameters are verified: safety parameters, ergonomic conditions and production parameters directly in the production process. Because of the presence of the human worker who can contribute to the task completion time uncertainty, the capacity of the production test is included in the testing. The last section is the overall safety check applied to the whole production cycle.

The proposed methodology was applied in the design of the pilot workplace in the ŠKODA AUTO a.s. company. Thanks to having a free hand in choice of the optimal workspace, I was able to apply all the steps of the methodology excluding the last step which was solved in an additional study. The target area which was the body shop in the car production company was inspected in detail and two workplace candidates with the high potential of collaborative robot application were chosen. With the more detailed comparison of the benefits and a higher grade of applied collaborative principles which guarantees higher potential of demonstration and verification of the proposed methodology one of those candidates was chosen. The chosen workplace is an assembly of the rear bumper reinforcement.

Three operations carried out at this workplace had a potential for the robotization. Manipulation with the 5 kg component was transferred from the operator to the robot. This helped with the ergonomics because the load was relieved from the operator's arms and back. The process of sealing glue deployment was stabilized with the robot which improved the quality of the sealing. The last operation which was transferred to the robot was holding the unstable part during the assembly. This change improved the assembly process and led to the assembly time optimization. Based on the working environment analysis which leads to robot working range specification and the analysis of the manipulated part, the robot UR10 from Universal Robots was chosen. Design of the end effector considers safety design requirements for devices operating in the presence of a worker. One of the goals was to try to demonstrate all four collaborative scenarios. In the first phase of the process, when the robot manipulates the part and applies the sealing glue, the presence of the operator within the range of the robot was evaluated as dangerous. The robot operates in a speed and separation monitoring mode and stops immediately when the working area observed with a safety scanner is interfered. When the robot reaches the target position it is switched to the mode of monitored stop and waits for the operator. The principle of hand guiding was planned for precise positioning of the assembled part. This was simplified to manual assembly because of a difficult manipulation with the robot which operated almost on the maximal radius. After the operator receives the part from the robot, it moves to the home position in the mode of power and force limitation.

In the pre-production test, I performed a measurement with the assistance of the Sick company which has an experience in safety measurements and has a proper device. The measurement of robot stopping time confirmed the safety layout proposed during the design phase. The impact force measurement was performed in four different situations and all results were within the safe limits and the operator was not endangered. The workspace was realized in the production line and optimized

on behalf of the operator's feedback. After minor trajectory changes and safety devices adjustment the system works in 3 shift production from August 2018 until today (May 2019).

The last part of the methodology – a safety check during the whole production process – has been solved in the additional study during the internship at Tohoku University in Japan. With the 2 degrees of freedom manipulator designed in the laboratory of professor Kosuge and assistant professor Kinugawa there was performed an analysis of the impact energy based on the relative velocity between the operator and the robot. The result from the first measurement was exceeding the safety limits more than 3 times. According to ISO TS 15066 I proposed a method for a verification of the safe robot velocity and following kinematic parameters decrease to comply with the safe values. This method is based on decreasing the robot speed. In some cases, the decreased velocity leads to an excessive decrease of effectivity. Different synchronisation approaches were tested to find the optimal timing. Results of this analysis will be presented at the AIM 2019 conference in Hong Kong. Other characteristics of the method are discussed in the paper.

I consider the definition of procedures for safety verification of collaborative workplaces, which leads to the proposal of methodology for designing them as my contribution to this scientific discipline. This methodology was successfully applied and verified its correctness during the creation of the pilot workplace which was completed in 2018 in the course of my internship in the ŠKODA AUTO a.s. company.

10 Recommendation for further research

The design of a collaborative workplace is still a new topic in industrial robotics with a minimum of reference systems which were implemented in non-laboratory conditions. Experiences from the state of art analysis, already implemented solutions and the pilot project described in this thesis generated topics for the next research.

The field of collaborative robots is still a developing industry with limited options. This gives an advantage to conventional robotic cells without human presence during operation. The next research should be focused on an effective operator detection in the workplace and the identification of a possible collision and a reaction to this situation. The second direction is an interaction between the operator and the workplace. This problem is handled in the author's publication „Interaction with collaborative robot using 2D and TOF camera“ and will be solved in the next research.

The introduced methodology must be verified and applied to design more than one workplace and determine weaknesses and specify other details. The safety check during operation which was introduced in the end of the thesis was verified on the basic manipulator and there is a space for generalization of the procedure. The method of decreasing the velocity of the manipulator is not sufficiently robust and the solution might be a change of the robot trajectory based on the potential field dependent on the relative velocity found out in the proposed method.

11 Reference

- [1] Statistická data nezaměstnanosti, Úřad práce ČR, [online] [cit. 2019-01-02] zdroj: <https://portal.mpsv.cz/sz/stat/nz/mes>
- [2] OECD Compendium of Productivity Indicators 2018 [online]. OECD, 2018 [cit. 2019-01-02]. OECD Compendium of Productivity Indicators. ISBN 9789264301115.
- [3] A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots. Engineering.com [online]. 28.10.2016 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13540/A-History-of-Collaborative-Robots-From-Intelligent-Lift-Assists-to-Cobots.aspx>
- [4] Skoda Auto, MATADOR Group and KUKA: ending the separation of humans and robots in factories. In: Ifr.org [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://ifr.org/news/skoda-auto-matador-group-and-kuka-ending-the-separation-of-humans-and-rob/>
- [5] Továrna ze sci-fi. Už před desítkami let tam uměli složit libovolné auto. In: Lidovky.cz [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.lidovky.cz/byznys/auto/tovarna-s-prvky-sci-fi-uz-v-ere-favoritu-mohly-linky-sestavit-libovolny-model.A170905_174916_In-auto_pave
- [6] Qualitätssicherung: Audi setzt auf Grazer Nextsense. In: Factorynet.at [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://factorynet.at/a/qualitaetssicherung-audi-setzt-auf-grazer-nextsense>
- [7] STIHL opens up new avenues with FANUC's Collaborative Robot. In: Ifr.org [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://ifr.org/case-studies/collaborative-robots/stihl-opens-up-new-avenues-with-fanucs-collaborative-robot>
- [8] Human-robot collaboration. In: Fanuc.eu [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.fanuc.eu/si/sl/o-nas/news-and-events/press_release_human-robot-collaboration
- [9] Humans and robots working in harmony at Ford Cologne factory. In: Newatlas.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://newatlas.com/ford-human-robot-collaboration-cobot/44367/>
- [10] Robot vs. Cobot. In: Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/robot-vs-cobot.html>
- [11] Produktionstechnologie: Roboter gegen Rückenschmerzen. In: Automobilwoche.de [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.automobilwoche.de/article/20150212/NACHRICHTEN/150219970/produktionstechnologie-roboter-gegen-rueckenschmerzen>
- [12] Getting Started with Collaborative Robots: Machine Tending. In: Blog.robotiq.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/getting-started-with-collaborative-robots-machine-tending-application>
- [13] Collaborative Robot Sawyer Enters Korean Market. In: Engineering.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13364/Collaborative-Robot-Sawyer-Enters-Korean-Market.aspx?e_src=relart
- [14] Universal Robots polishes Paradigm to 50% production increase. In: Universal-robots.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/case-stories/paradigm-electronics/>

- [15] Universal Robots Showcases UR10 Collaborative Robotic Arms at Taipei International Automation Exhibition. In: Technews.co [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://technews.co/2016/09/06/show-report-universal-robots-showcases-ur10-collaborative-robotic-arms-at-taipei-international-automation-exhibition/>
- [16] BMW Werk Spartanburg, Produktion, Montage, Ergonomische Mensch Roboter Kooperation. In: Press.bmwgroup.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90126956/bmw-werk-spartanburg-produktion-montage-ergonomische-mensch-roboter-kooperation-07-2013>
- [17] What Does Collaborative Robot Mean ?. In: Blog.robotiq.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>
- [18] Use a Robot....but Why?. In: Crossco.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.crossco.com/blog/use-robotbut-why>
- [19] SNAPWELD BY ARC SPECIALTIES. In: Arcspecialties.com [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.arcspecialties.com/products/snapweld-arc-specialties/>
- [20] Pioneering creator of collaborative 'cobots' Rethink Robotics shuts down. In: Theverge.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2018/10/4/17935820/rethink-robotics-shuts-down-baxter-sawyer-robot-cobots>
- [21] Nedostatek pracovníků tlačí firmy k robotizaci. Prosazují se i roboti spolupracující s člověkem. In: Logistika.ihned.cz [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://logistika.ihned.cz/c1-65513620-nedostatek-pracovniku-tlaci-firmy-k-robotizaci-prosazuji-se-i-roboti-spolupracujici-s-ctovkem>
- [22] Universal Robots+ Hosts Over 100 Automation Accessory Developers. In: Engineering.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/15006/VIDEO-Universal-Robots-Hosts-Over-100-Automation-Accessory-Developers.aspx>
- [23] Bezpečnostní nášlapné rohože Haake HSM. In: Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//bezpecnost-stroju-komponenty/bezpecnostni-naslapne-rohoze-haake-hsm.html>
- [24] Bezpečnost strojů realizovaná světelnými závory. In: Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//bezpecnost-stroju/bezpecnost-stroju-a-zarizeni-realizovana-svetelnymi-zavesy>
- [25] World's Most Compact Safety Laser Scanner. In: Designworldonline.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/worlds-most-compact-safety-laser-scanner/>
- [26] Bezpečnostní kamerové systémy. In: Sick.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/optoelektronicka-ochranna-zarizeni/bezpecnostni-kamerove-systemy/c/g192052>
- [27] Camera-based protection system PSEnvip. In: Pilz.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-AU/eshop/00106002207043/PSEnvip-camera-based-protection-system>
- [28] Safe camera system SafetyEYE. In: Pilz.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-AU/eshop/00106002207042/SafetyEYE-Safe-camera-system>
- [29] New Digital Signal Force Torque Sensor for Universal Robots. In: Engineering.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z:

<https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11334/New-Digital-Signal-Force-Torque-Sensor-for-Universal-Robots.aspx>

[30] Assistenzroboter gehen in die Produktion. In: Mrk-systeme.de [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mrk-systeme.de>

[31] APAS assistant mobile. In: Bosch-apas.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.bosch-apas.com/produkte-und-services/apas-assistant-mobile/>

[32] Reliable Collision Detection for Human-Robot Interaction. In: Iff.fraunhofer.de [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/tactile-sensor-systems-pressure-sensitive-robot-skin.html>

[33] Collaborative robot CR-35iA. In: Fanuc.eu [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/be/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots/collaborative-cr35ia>

[34] Open-loop torque control on joint position-controlled robots. In: Patents.google.com [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US7986118>

[35] LIND, Morten; SCHRIMPF, Johannes; ULLEBERG, Thomas. Open real-time robot controller framework. In: CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, TK Lien, Ed. NO-7005, Trondheim, Norway: Tapir Academic Press. 2010. p. 13-18.

[36] MAGNETIC ENCODERS FOR SMART FACTORY AUTOMATION. In: Rls.si [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.rls.si/en/magnetic-encoders-for-industrial-robotics>

[37] PFEIFFER, Friedrich. The TUM walking machines. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007, 365(1850), 109-131. DOI: 10.1098/rsta.2006.1922. ISSN 1364-503X. Dostupné také z: <http://www.royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2006.1922>

[38] LOUGHLIN, Clive, A. ALBU-SCHÄFFER, S. HADDADIN, Ch. OTT, A. STEMMER, T. WIMBÖCK a G. HIRZINGER. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. Industrial Robot: An International Journal. 2007, 34(5), 376-385. DOI: 10.1108/01439910710774386. ISSN 0143-991X. Dostupné také z: <https://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/01439910710774386>

[39] PAINE, Nicholas, Sehoon OH a Luis SENTIS. Design and Control Considerations for High-Performance Series Elastic Actuators. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2014, 19(3), 1080-1091. DOI: 10.1109/TMECH.2013.2270435. ISSN 1083-4435. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6555856/>

[40] Safeguarding Automation Cells. In: Robots – Playing it Safe in the Workplace [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.rockfordsystems.com/2016/12/28/safeguarding-robots/>

[41] Top 8 Must-See Robotic Technologies at Automatica. In: Robotiq [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/bid/71310/Top-8-Must-See-Robotic-Technologies-at-Automatica>

[42] Major Robot OEMs Fast-Tracking Cobots. In: Robotics.org [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Major-Robot-OEMs-Fast-Tracking-Cobots/content_id/5033

[43] New Kawasaki intelligent robot safety system opens up Human Machine Interface (HMI) opportunities. In: News.cision.com [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z:

<https://news.cision.com/kawasaki-robotics-uk-limited/r/new-kawasaki-intelligent-robot-safety-system-opens-up-human-machine-interface--hmi--opportunities,c9328450>

[44] Yumi. In: New.abb.com [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/yumi>

[45] LBR iiwa – nová éra robotiky přichází!. In: Controlengcesko.com [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/lbr-iiwa-nova-era-robotiky-prichazi/>

[46] THE UR5 - A FLEXIBLE COLLABORATIVE ROBOT ARM. In: Universal-robots.com [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>

[47] KOUDELKA, Ctirad a Václav VRÁNA. RIZIKA A JEJICH ANALÝZA. VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2006. Dostupné také z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Magisterske%20nav/prednasky/web/RIZIKA.pdf>

[48] Bezpečnost strojů - 2. díl - PL vs. SIL. In: Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju/bezpecnost-stroju-2-dil-pl-vs-sil.html>

[49] Příručka bezpečnosti: Bezpečnost strojů – Jokab Safety. In: Library.e.abb.com [online]. 2013 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/efb3781390c4499686c1e5f1244db08f/ABB%20Prirucka%20bezpecnosti%20-%20Katalog%20JokabSafety.pdf>

[50] Risk Assessment Template to Ease your Integration. In: Blog.robotiq.com [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/risk-assessment-template-to-ease-your-integration>

[51] TANAKA, Yasufumi, Jun KINUGAWA, Yusuke SUGAHARA a Kazuhiro KOSUGE. Motion planning with worker's trajectory prediction for assembly task partner robot. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012, 2012, , 1525-1532. DOI: 10.1109/IROS.2012.6386043. ISBN 978-1-4673-1736-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6386043/>

[52] Pain threshold map. In: Dguv.de [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/kollaborierende-roboter/schmerzschwellenkataster/index-2.jsp>List of average human height worldwide [online]

[53] List of average human height worldwide. In: Wikipedia.org [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_average_human_height_worldwide#cite_note-83

[54] DRILLIS, Rudolf; CONTINI, Renato; BLUESTEIN, Maurice. *Body segment parameters*. New York University, School of Engineering and Science, 1969.

12 Vlastní publikace

ČLÁNEK

PASTOR, R., **VYSOCKÝ, A.**, ŠIROKÝ, P., KONEČNÝ, Z., KÁRNÍK, L. Use of Different Simulation Methods for Design of Experimental Rover. *MM Science Journal*, 2018, December, p. 2616-2620. (SCOPUS)

VYSOCKÝ, A., NOVÁK, P. HUMAN – ROBOT COLLABORATION IN INDUSTRY. *MM Science Journal*, 2016, June, p. 903-906. (SCOPUS, Citace: 14 z toho SCOPUS:7 bez autocitací)

PROTOTYP, FUNKČNÍ VZOREK

VYSOCKÝ, A., PASTOR, R. Experimentální podvozek roveru na bázi paralelogramu. 2018.

VYSOCKÝ, A. Multifunkční pracovní stůl pro průmyslový robot. 2018.

HECZKO, D., **VYSOCKÝ, A.** Manipulátor pro mobilní robot. 2018.

PASTOR, R., **VYSOCKÝ, A.** Kolo se zabudovaným pohonem. 2018.

VYSOCKÝ, A., MAREK, J., BOBOVSKÝ, Z., KRYŠ, V. Řídicí modul modulárního robotického podvozku. 2015.

GALA, M., **VYSOCKÝ, A.**, MELČÁK, J., KRYŠ, V. Mobilní robot ODIN s modulárním manipulátorem. 2014.

ŠIROKÝ, P., **VYSOCKÝ, A.**, BOBOVSKÝ, Z., KRYŠ, V. Pohonný modul modulárního podvozku. 2014.

PŘÍSPĚVEK VE SBORNÍKU

VYSOCKÝ, A., PASTOR, R., NOVÁK, P. Interaction with collaborative robot using 2D and TOF camera. In *Lecture Notes in Computer Science. Volume 11472*. Cham : Springer, 2019, p. 477-489. (SCOPUS, WoS)

PASTOR, R., **VYSOCKÝ, A.**, NOVÁK, P. A study on direct teleoperation device kinematics. In *Lecture Notes in Computer Science. Volume 11472*. Cham : Springer, 2019, p. 140-146. (SCOPUS, WoS)

13 Seznam příloh

Příloha č.1 – detailní popis hodnocení operací na pracovišti

Příloha č.2 – Přehled parametrů cobotů

Příloha č.3 – Simulační prostředí v MS EXCEL – PadySimulator.xlsx

Příloha č.1 – detailní popis hodnocení operací na pracovišti

Operace č.1 – výběr dílu z kontejneru

Hodnocení náročnosti automatizace stupněm „vysoká“ z důvodu logistického balení vstupního dílu nevhodného pro automatizaci. Díly jsou v kontejnerech umístěny neorientovaně (Obr. 86) a jejich tvar způsobuje vysokou pravděpodobnost zaklínění do ostatních dílů. Automatizace by vyžadovala specifickou aplikaci Bin Pickingu a změnu umístění kontejnerů kolem pracoviště nebo změnu logistického balení na robotické palety.



Obr. 86 Díly v kontejneru nejsou přesně pozicovány a orientovány

Operace č. 2 – manipulace s dílem

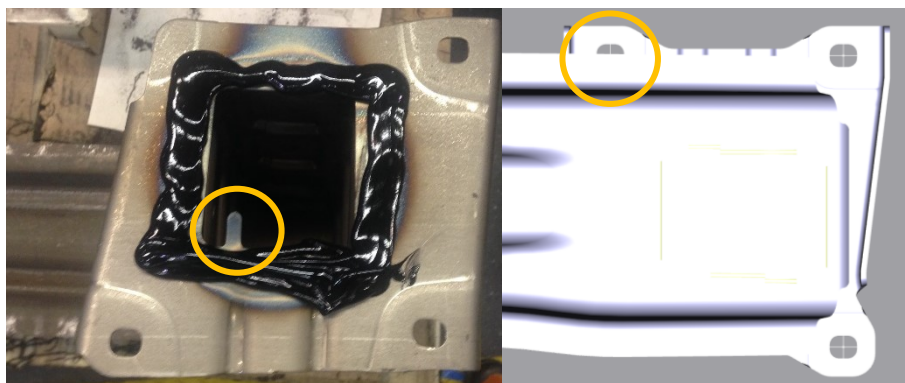
Manipulace s dílem o hmotnosti cca 5 kg s dostatečnými plochami pro úchop je standardní, a proto je náročnost automatizace hodnocena jako „nízká“. Komplikací by mohlo být, pokud by bylo potřeba manipulovat všemi třemi typy dílu pomocí jednoho koncového efektoru. Univerzální efektor je také nenáročně řešitelný.

Operace č.3 – nanášení tmelu

Pro nanášení tmelu (Obr. 87) jsou hodnoceny dva přístupy. Částečná automatizace s hodnocením náročnosti „nízká“, kdy v případě nanášení tmelu na díl je robotem díl manipulován pod statickou lepicí stanicí. V případě plná automatizace, kdy je u některých karoserií vyžadováno nanášení tmelu přímo na karoserii, by bylo nutné navrhnout kombinovaný efektor pro lepicí pistoli a manipulaci dílu nebo zařadit další robot. Tento přístup je hodnocen, jako „střední“ náročnost automatizace.

Operace č.4 – nasazení dílu na místo montáže

Náročnost operace č.4,5,6 a 7 je ovlivněna neurčitostí základací pozice dílu. Karoserie na dopravníku zastavuje po projetí nad optickým snímačem. Poloha karoserie se každým pracovním cyklem může lišit ve všech osách v řádech několika milimetrů. Díl je před montáží přichycen ke karoserii zavěšením na háčky (Obr. 87). Díl tedy musí být umístěn poměrně přesně a základací poloha by tak musela být korigována kamerovým systémem a korekce nepřesností výroby umožněna poddajností robotu za pomoci silového senzoru. Náročnost automatizace je tedy hodnocena jako „střední“.



Obr. 87 Ručně nanesený tmel na dílu s označeným háčkem (vlevo) díra v zákrytu (vpravo)

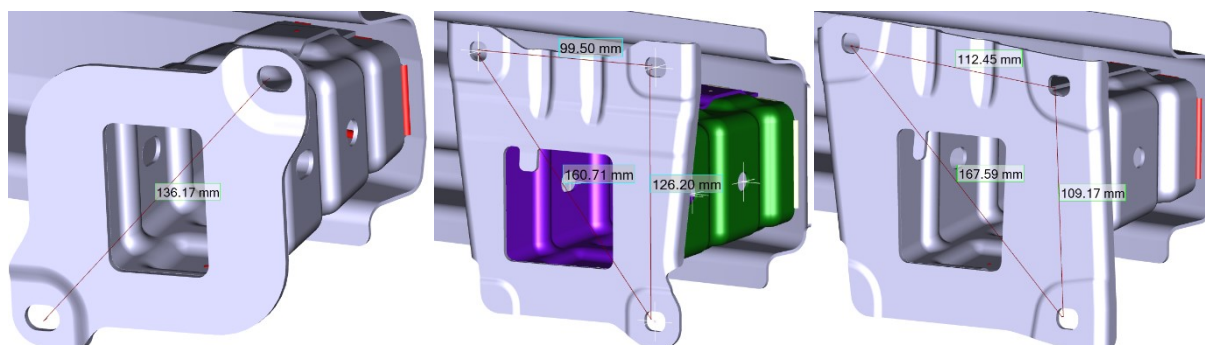
Operace č. 5

Alternativou k nasazení na přídržné háčky je nasazení dílu na šrouby v karoserii a přitlačení do montážní polohy. Po utažení alespoň jedné z matic může být díl povolen. Roboty pro spolupráci s člověkem mohou detekovat kolizi a tím pádem i detekovat kontakt dílu s karoserií, tímto je kompenzována nepřesnost základací polohy.

Operace č.6 – montáž dílu

Díly jsou ke karoserii přimontovány šesti šrouby nebo čtyřmi maticemi dle typu karoserie. V případě matic díl nemá háčky a po nasazení je nestabilní. Pro různý spojovací materiál je vyměřována násada na utahovače. Šrouby/matice jsou utahovány na definovaný moment. Tři různé díly mají různé rozteče děr (Obr. 88) a nemůže tak být použita vícevřetenová utahovačka. Problematický je přístup k jedné z děr, která je při montáži v zákrytu z pohledu na zadní stranu karoserie (Obr. 87). V některých případech je matice pro šroub v karoserii nepřesně navařena a šroub musí být dotažen pneumatickou utahovačkou.

Náročnost automatizace je vyhodnocena jako „vysoká“ z důvodu variability spojovacího materiálu a pozic utahování, a také nedeklarované přesnosti děr v karoserii způsobující problematické utažení některých šroubů.



Obr. 88 Různé rozteče děr na dílu

Operace č.7 – nasazení dveřního háčku

Tato operace je na daném pracovišti doplňková a nesouvisí s hlavním úkolem – montáží nosníku nárazníku. Háček je nasazen na rám předních a zadních dveří, které jsou v této fázi výroby bez zámku a mohly by se samovolně otevřít. Pokud by měla být tato operace automatizována, bylo by vhodnější ji přemístit na jiné pracoviště, a proto je hodnocena náročnost jako „střední“.

Příloha č.2 – Přehled parametrů cobotů

Výrobce	Název	DoF	Nosnost	Dosah	Opakovaná přesnost polohování	Hmotnost	Napájení	Maximální rychlost
ABB	YuMi	7 (2x7)	0,5 kg x2	500 mm	0,02 mm	38 kg	100–240 VAC	1,5 m.s ⁻¹
ABB	Roberta	6	4/8/12 kg	600/800/1200 mm	0,1 mm	14,5/19,5/30,5 kg	24 VDC	-
AUBO	I5	6	5 kg	880 mm	±0,05 mm	24 kg	24 VDC	-
BOSCH	APAS	6	4 kg	911 mm	0,03 mm	230 kg	230 VAC	0,5 m.s ⁻¹
COMAU	AURA NJ4110 2.2	6	110 kg	2210 mm	0,07 mm	685 kg	400-575 VAC	1,7 m.s ⁻¹
FANUC	CR-35iA	6	35 kg	1813 mm	0,08 mm	990 kg	380–575 VAC	0,75 m.s ⁻¹
FANUC	CR-4iA	6	4 kg	550 mm	±0,02	48 kg	200–230VAC	1 m.s ⁻¹
FANUC	CR-7iA (L)	6	7 kg	717/911 mm	±0,02/±0,03	53/55 kg	200–230VAC	1 m.s ⁻¹
FESTO	Bionic Cobot	7	1,5 kg	-	1 mm	6 kg	-	-
F&P PERSONAL ROBOTICS	P-Rob 2	6	3 kg	775 mm	0,1 mm	20 kg	100–240 VAC	-
FRANKA	EMIKA	7	3 kg	800 mm	±0,1 mm	18,5 kg	100–240 VAC	2 m.s ⁻¹
KAWADA INDUSTRIES	NEXTGAGE	15	1,5 kg x2	-	0,03 mm	29 kg	90–264 VAC	-
KAWASAKI	duAro	8 (2x4)	2 kg x2	760 mm	0,05 mm	145 kg	200–220 VAC	-
KUKA	LBR iiwa 7 (14)	7	7/14 kg	800/820 mm	0,1/0,15 mm	23,9/29,9 kg	110–230 VAC	-
LIFE ROBOTICS	CORO	6	2 kg	865 mm	±1 mm	26 kg	100–230 VAC	2 m.s ⁻¹
MABI	Speedy 6/12	6	6/12 kg	800/1250 mm	±0,1 mm	28/35 kg	100–240 VAC	-
MRK SYSTEME	KR 5 SI	6	5 kg (3 kg s efektem)	1423 mm	0,04 mm	-	-	-
PRECISE AUTOMATION	PAV P6	6	2 kg	432 mm	0,02 mm	28 kg	90-264 VAC	-
PRECISE AUTOMATION	PP 100	3	1 kg	X:635 mm Y:300 mm Z:225 mm	±0,09 mm	20 kg	90-264 VAC	1,5 m.s ⁻¹
PRECISE AUTOMATION	PF400	4	0,5 kg	576/731 mm	±0,1 mm	20/32 kg	90-264 VAC	1 m.s ⁻¹
RETHINK ROBOTICS	Sawyer	7	4 kg	1260 mm	0,1 mm	19 kg	120 VAC	1 m.s ⁻¹
RETHINK ROBOTICS	Baxter	14 (2x7)	2,3 kg	1041,4 mm	-	75 kg	120 VAC	1 m.s ⁻¹
STÄUBLI	TX2-X0	6	1,7 - 7 kg	515–1450 mm	±0,04 mm - ±0,02 mm	27–116 kg	-	8,2 m.s ⁻¹ - 11,09 m.s ⁻¹
TM ROBOTICS	TECHMAN	6	4/6 kg	700/900 mm	±0,1 mm	21 kg	100-240 VAC	-
UNIVERSAL ROBOTS	UR3, UR5, UR10	6	3/5/10 kg	500/850/1300 mm	±0,1 mm	11/18,4/28,9 kg	100-240 VAC	1 m.s ⁻¹
YASKAWA	Dual Arm	15	5/10/20 kg	845/720/1323 mm	±0,1 mm	110/220/380 kg	(220-230) 400-440 VAC	-
YASKAWA	HC10	6	10 kg	1200 mm	±0,1 mm	47 kg	220/230 VAC	-